

Desarrollo del sistema de propulsión diésel-eléctrico de un catamarán

Trabajo Final de Grado

Trabajo realizado por:

Víctor Canela Badrinas

Dirigido por:

Manuel Rodríguez Castillo



Grado en Ingeniería en
Sistemas y Tecnología Naval

Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

Barcelona, 10 de abril de 2018

Agradecimientos

A Manuel Rodríguez Castillo, tutor del trabajo de final de grado, por su persistente motivación para terminar el proyecto, su detallado seguimiento y sus minuciosas correcciones.

A Ramón Mir Rubio, director de Narwal Electric S.L. y armador de Nofris, por abrir las puertas de su empresa y hacerme partícipe de este novedoso proyecto que tantos quebraderos de cabeza nos ha dado, pero que siempre con cerveza y sangre fría han salido adelante.

A Raúl Nualart Salinas, gerente mecánico de Motor Nautic Arenys S.L., por su extensa aportación de conocimientos mecánicos y colaboración con el desarrollo del plan de mantenimiento de la nueva instalación.

A Marta Saguer Capell, licenciada en lenguas aplicadas, por su interminable paciencia para revisar la ortografía, los criterios de redacción y opinar, desde su punto de vista subjetivo, para mejorar la comprensión escrita del proyecto.

Resumen

El siguiente proyecto desarrolla la modificación del sistema propulsivo convencional de una embarcación de recreo por un nuevo sistema híbrido.

Realizando una breve incursión sobre la propulsión diésel eléctrica naval y, comprendiendo así su funcionamiento, se verá una leve pincelada de la propulsión híbrida tanto en grandes buques como en embarcaciones de recreo.

Una vez conocidas las bases, se estudia la viabilidad de la instalación del nuevo sistema diésel eléctrico teniendo en cuenta sus ventajas e inconvenientes. Cerciorando en todo momento la compatibilidad con la embarcación elegida.

Tras valorar los costes de la nueva instalación, se elabora su diseño y se redimensionan todos los parámetros necesarios a los que afecta la nueva construcción.

Una vez elaborado todo el anteproyecto, se efectúa la instalación del nuevo sistema de propulsión documentando en todo momento la instalación.

Tras terminar la instalación, se llevan a cabo las pruebas de mar, verificando la instalación a modo de ajustarla y mejorarla, si es preciso. De igual modo, se toman mediciones para analizar los resultados y validar la satisfacción final del proyecto.

Abstract

The following project develops the modification of a pleasure sailboat's conventional propulsive system by a new hybrid one.

Making a brief aside into the naval diesel electric propulsion and understanding its operation, there is a slight piece of the hybrid propulsion in both liner and recreational boats.

Once the bases are known, there is a study about the feasibility of installing a new electric diesel system taking into account its advantages and disadvantages. Always ensuring compatibility with the chosen vessel.

After evaluating the costs of the new installation, its design is elaborated and all the necessary parameters that are affected by the new construction are resized.

Then, the preliminary draft has been prepared and the installation of the new propulsion system is carried out, documenting it at all times.

After finishing the installation, the sea trials are carried out verifying the installation in order to adjust it and improve it, if necessary. In the same way, measurements are taken to analyze the results and validate the final satisfaction of the project.

Tabla de contenido

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Introducción	1
1. Capítulo 1. Viabilidad del sistema	3
1.1. Propulsión diésel eléctrica	3
1.1.1. El principio de la planta eléctrica	4
1.1.2. Ahorro de combustible y contaminación ambiental	5
1.1.3. Propulsión diésel eléctrica en grandes buques	6
1.1.4. Propulsión diésel eléctrica en embarcaciones de recreo	7
2. Capítulo 2. Elección de la embarcación	11
3. Capítulo 3. Estudio económico	15
4. Capítulo 4. Diseño de la instalación	17
4.1. Distribución y configuración	17
4.2. Especificaciones técnicas de los componentes	19
4.2.1. Propulsión	19
4.2.2. Almacenaje	20
4.2.3. Generación	21
4.3. Dimensionado de la instalación	23
4.3.1. Cálculo de la potencia requerida por la instalación	23
4.3.2. Dimensionado de la capacidad de las baterías	25
4.3.3. Dimensionado del cableado	25
4.3.4. Cálculo de autonomía	26
5. Capítulo 5. <i>Refit</i>	29
5.1. Instalación del sistema de propulsión	29
5.2. Instalación del generador	31
5.3. Instalación del banco de baterías	32
5.4. Instalación de los componentes y cableado	32
5.5. Otras modificaciones	34

6. Capítulo 6. Plan de mantenimiento	35
7. Capítulo 7. Pruebas de mar	39
8. Capítulo 8. Análisis de resultados	43
9. Conclusiones	45
10. Bibliografía	47
11. Anexos	49

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Inicios de la utilización de propulsión eléctrica combinada en submarinos durante la Segunda Guerra Mundial. Fuente: desconocida	3
Ilustración 2. Esquema de los principales sistemas de un buque de carga de propulsión diésel eléctrica. Fuente: desconocida	4
Ilustración 3. Se emite menos NOx si la carga en el motor es alta. Fuente: Wärtsilä Diésel	6
Ilustración 4. Propulsor eléctrico tipo POD de 20/25CV. Fuente: Torqueedo	7
Ilustración 5. Propulsor eléctrico tipo Saildrive de 40CV. Fuente: Torqueedo	7
Ilustración 6. Propulsor eléctrico de 40/80CV diseñado para acople a eje. Fuente: Torqueedo	7
Ilustración 7. Casco de 15 m de eslora fabricado en aluminio, propulsado por dos motores eléctricos retráctiles. Fuente: Metal Composite Yachts	8
Ilustración 8. Motor eléctrico síncrono trifásico de 7,5kW (produce un par de giro similar a un motor diésel de 29CV). Fuente: Bellmarine	9
Ilustración 9. Ro 340Eco, pionero en su mercado. Fuente: Ronáutica Yachts	9
Ilustración 10. Planos en perfil y planta del Iroquois 30. Fuente: desconocida	11
Ilustración 11. Perfil en formato digital con plano vélico. Fuente: armador del Nofris	12
Ilustración 12. Alzado en formato digital. Fuente: armador del Nofris	12
Ilustración 13. Nofris, primera varada para su refit. Puerto de Premiá. Fuente: propia	13
Ilustración 14. Esquema simplificado de la instalación. Fuente: Star Boats. Reedición: propia	17
Ilustración 15. Plano en planta AutoCAD. Distribución interior y diseño de la instalación. Fuente: propia	18
Ilustración 16. Detalle de dimensiones del propulsor. Cotas en milímetros. Fuente: Star Boats.	19
Ilustración 17. Propulsor E-TECH 2 POD/24V con hélice fija de tres palas. Fuente: Star Boats	19
Ilustración 18. Batería GEL 12V 110Ah Victron. Fuente: Victron Energy	20
Ilustración 19. Generador Fischer Panda AGT-DC 12V PMS. Fuente: Azimut Marine	21
Ilustración 20. Dimensiones Generador Fischer Panda AGT DC 4000 PMS. Cotas en milímetros. Fuente: manual de usuario Fischer Panda	22
Ilustración 21. Tabla de secciones de cableado en función de intensidad demandada y temperatura ambiente. Fuente: manual de instalación Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS	25
Ilustración 22. Gráfica de consumo del generador en kW/l con los valores de velocidad crucero y máxima destacados. Fuente: propia	27
Ilustración 23. Estado inicial del casco. El patín de estribor presenta partes traslúcidas en las zonas de la fibra afectadas por la osmosis. Fuente: propia	29

Ilustración 24. Relaminado interior de la sala de máquinas, en tipo sándwich con panel de abeja y fibra de vidrio multidireccional. Fuente: propia	29
Ilustración 25. Detalle del taladro para pasar el cableado del propulsor. Puede apreciarse el espesor original del casco de 1,5 cm aumentado a 2 cm finalmente. Fuente: propia	30
Ilustración 26. Detalle del ensamblaje interior del propulsor, montaje sobre pletina de aluminio acoplada mediante seis tornillos roscados de M9 y sellado con polímero Sika 291i. Fuente: propia	30
Ilustración 27. Cuadernas de fibra de vidrio fabricadas en sándwich con panel de abeja e inyección de resina por vacío. Fuente: propia	30
Ilustración 28. En azul, salas de máquinas delimitadas por cuadernas y relaminadas. Fuente: propia	30
Ilustración 29. Secuencia de montaje y acabado del propulsor de babor. Fuente: propia	31
Ilustración 30. Planteamiento de la ubicación del generador, utilizando un depósito de cotas prácticamente similares. Fuente: propia	31
Ilustración 31. Tambucho de popa babor, con gran capacidad de estiba, aloja también el tanque de combustible. Fuente: propia	31
Ilustración 32. Tanque de combustible de 120 litros. Fuente: propia	31
Ilustración 33. Banco de 24V del propulsor de estribor a falta de trincar. Fuente: propia	32
Ilustración 34. Propuesta de cajón de madera y fijación por cinchas. Fuente: Fondear	32
Ilustración 35. Cargador TBS Omnicarge 24V/30A durante su colocación temporal junto con las baterías de servicios. Fuente: propia	32
Ilustración 36. Regulador de potencia del propulsor de estribor, con su conexión finalizada, a falta de empotrar en la cuaderna de la sala de máquinas. Fuente: propia	33
Ilustración 37. Planteamiento del mando acelerador durante las pruebas de mar. Fuente: propia	33
Ilustración 38. Controlador de baterías Victron Energy compuesto de pantalla multifunción y shunt. Fuente: propia	34
Ilustración 39. Relaminado de la superficie de casco bajo la litera de proa babor. Fuente: propia	34
Ilustración 40. Proceso de nivelado de la regala rellenando con masilla epoxy tras el enfibrado previo. Fuente: propia	34
Ilustración 41. Botadura Nofris, varadero de Premiá. Fuente: propia	39
Ilustración 42. Configuración por defecto del controlador de los propulsores. Fuente: Manual de usuario Kelly KLS-S Brushless Motor Controller	40
Ilustración 43. Reprogramación de los parámetros del controlador. Fuente: Kelly KLS Configuration Program	40
Ilustración 44. Algunos valores obtenidos, a velocidad de crucero y velocidad máxima. Fuente: propia	41

Ilustración 45. Instantánea del video del funcionamiento del propulsor de babor tras un año sumergido. Fuente: propia	41
Ilustración 46. Equipo de filmación compuesto por una cámara sumergible y el bichero de a bordo. Fuente: propia	41
Ilustración 47. Gráfica de consumo litros por nudo. Elaboración: propia	44
Ilustración 48. Gráfica de consumo RPM/litro. Obtenida a partir de valores de consumo ofrecidos por Boat Fuel Economy. Elaboración: propia.	49
Ilustración 49. Gráfica de consumo kW/litro. Obtenida mediante regresión lineal de los consumos ofrecidos por el fabricante Fischer Panda. Elaboración: propia.	50
Ilustración 50. Plano de la planta del sistema propulsivo. Fuente: propia.	51
Ilustración 51. Plano de la planta del sistema eléctrico de servicios a 12V. Fuente: propia.	52
Ilustración 52. Tabla de mantenimiento motor fueraborda. Fuente: Manual de usuario Parsun F20HP.	53
Ilustración 53. Tabla de mantenimiento del generador. Fuente: Manual de usuario Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS.	54

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones TAVA'E	8
Tabla 2. Especificaciones Ro 340 Eco	9
Tabla 3. Componentes de la instalación y costes	15
Tabla 4. Especificaciones propulsor E-TECH	19
Tabla 5. Especificaciones de las baterías	20
Tabla 6. Especificaciones de los propulsores	21
Tabla 7. Valores de los consumidores a 24V	23
Tabla 8. Resumen de autonomía de la nueva instalación.	27
Tabla 9. Comparativa de plan de mantenimiento motor fueraborda y sistema híbrido	37
Tabla 10. Valores de amperímetro, tacómetro y GPS medidos en la segunda prueba de mar	43
Tabla 11. Consumos de potencia y litro obtenidos a raíz de la Tabla 10	43
Tabla 12. Ventajas e inconvenientes de la instalación híbrida	45

Introducción

La **propulsión híbrida**¹ diésel eléctrica lleva décadas en el sector naval. Desde la utilización militar en submarinos durante la Segunda Guerra Mundial, hasta la aplicación hoy día en grandes buques. Su evolución siempre se ha debido a las necesidades del sector.

Es ahora, más que nunca, cuando las normativas y restricciones medioambientales para la navegación de grandes buques entran en la partida. Obligando así, a evolucionar los sistemas de propulsión convencionales reduciendo de este modo emisiones y, ocasionalmente los enormes consumos diésel (véase Anexo 1).

Por otra parte, la náutica de recreo va abriendo sus puertas a este sistema de propulsión tan desconocido por el momento. Siendo los precursores de éste nuevo cambio los astilleros y armadores con visión de futuro.

Dado que un generador diésel trabaja a régimen prácticamente constante de revoluciones, su consumo es considerablemente menor al de un motor principal diésel o gasolina trabajando a distinto régimen en función de la velocidad del buque requerida. Es ésta la esencia de los sistemas de propulsión diésel eléctrico: obtener una reducción de consumo, reducir las emisiones y conseguir una capacidad de respuesta propulsora mayor (véase comparativa de consumos del motor de gasolina y del generador diésel presentes en el proyecto, Anexo 2).

Así pues, con la predisposición de un armador y las capacidades de algunos industriales del sector, optan por la remotorización de un catamarán de recreo de pequeña eslora.

El siguiente proyecto fue iniciado en abril de 2016, en estrecha colaboración con la empresa Narwal Electric S.L., en la que el autor estuvo trabajando y con la que a día de hoy sigue colaborando. La participación en el Iroquois 30, pasó de ser un proyecto más a una involucración personal, fruto de la curiosidad y la ambiciosa expectación que éste desprendía.

¹**Propulsión híbrida:** Dicho de un sistema propulsivo y, por extensión, de un vehículo; que puede funcionar tanto con combustible como con electricidad.

1. Capítulo 1. Viabilidad del sistema

Como se ha podido comprobar en proyectos anteriores, —véase, por ejemplo, Análisis de la instalación de un sistema de propulsión híbrido en un buque de practica, proyecto final de carrera por Daniel Segura Dávila— la verdadera viabilidad del funcionamiento de un sistema de propulsión diésel eléctrico en navíos, reside en la funcionalidad y uso para el cual va a ser destinada dicha embarcación.

Para comprender las mejoras de este modelo de propulsión es necesario hacer un inciso en la aplicación híbrida, tanto para grandes buques como para embarcaciones de recreo. Analizando así algunas de sus mejoras existenciales que pueden suponer en algunos de sus casos.

1.1. Propulsión diésel eléctrica

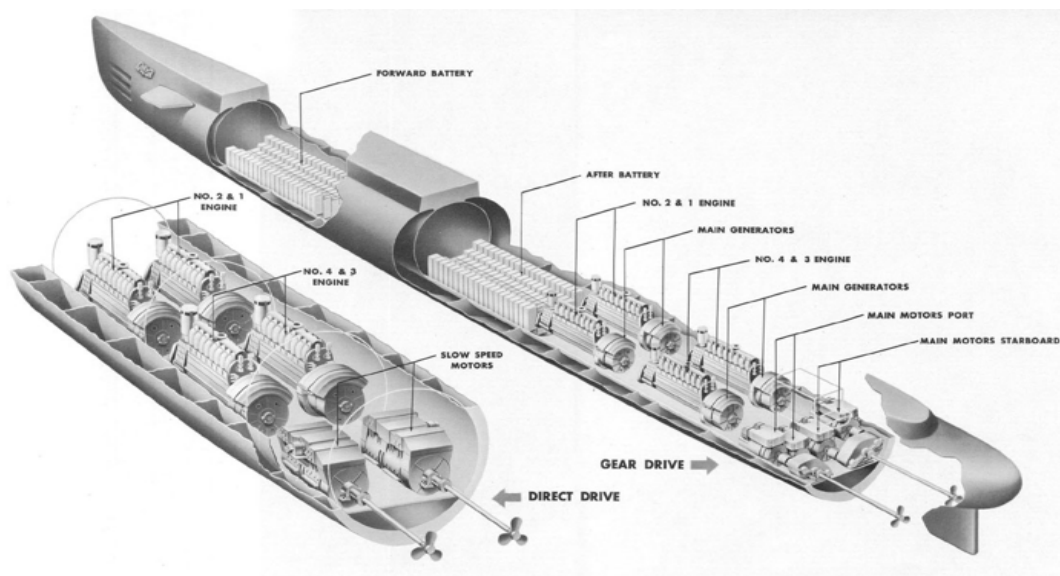


Ilustración 1. Inicios de la utilización de propulsión eléctrica combinada en submarinos durante la Segunda Guerra Mundial. Fuente: desconocida

La propulsión diésel eléctrica se lleva utilizando desde hace décadas en el sector naval. Un buen motivo a favor de éste sistema de propulsión es la capacidad que ofrece un motor eléctrico para proporcionar un par elevado a baja velocidad.

La instalación de un sistema de propulsión eléctrico requiere la sustitución del eje, entre el motor principal y la hélice, por un sistema compuesto por: generadores, cuadros de distribución, transformadores, accionamientos y motores.

Los motores diésel producen distinto nivel de emisiones a lo largo de todo su régimen de trabajo. En el rango óptimo de operación, la contaminación es menor y el rendimiento del combustible es considerablemente mayor que operando a baja velocidad.

Así mismo, cuando los bloques diésel operan a velocidad constante y óptima, el consumo de combustible es menor que cuando operan a velocidad variable.

Este objetivo no es posible con la transmisión mecánica tradicional, ya que la velocidad del motor está rígidamente acoplada a la velocidad de la hélice. Pero la situación cambia si se utiliza transmisión eléctrica (generadores y motores comunicados entre sí electrónicamente).

Así mismo, el exceso de energía generada, a su vez, puede compartirse con el resto de servicios de a bordo. De este modo decrece la potencia total instalada y al mismo tiempo aumenta la fiabilidad. Por lo tanto, la optimización del espacio se traduce en incremento de habitabilidad o carga útil del barco.

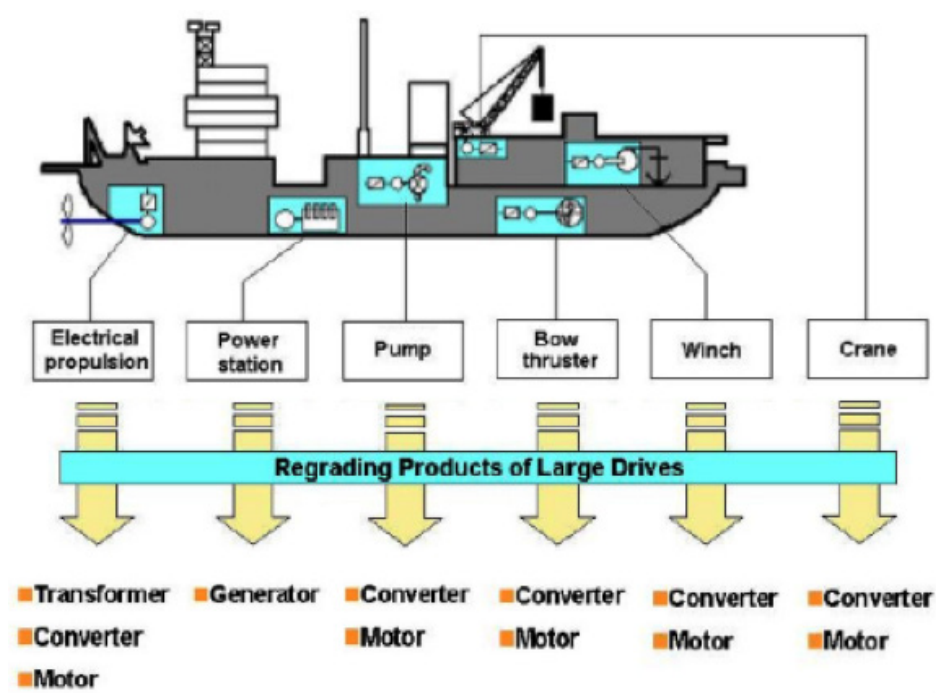


Ilustración 2. Esquema de los principales sistemas de un buque de carga de propulsión diésel eléctrica. Fuente: desconocida

1.1.1. El principio de la planta eléctrica

Antiguamente, la propulsión del buque y la producción de energía eléctrica solía ser suministrada por instalaciones independientes y aisladas.

Generalmente, la ubicación de los compartimentos de los motores está dictada por la línea de ejes de transmisión y por los sistemas de escape de los motores.

En el principio de la planta diésel eléctrica no existe conexión mecánica directa alguna entre el motor y la hélice, lo que da mayor libertad para la disposición y la ubicación de la maquinaria. Esto hace que pueda ser reorganizada y proporcionar mayor espacio para habitabilidad y/o carga. Por lo que se traduce en aumento de la flexibilidad y productividad del barco.

Además, se reduce la potencia total mecánica instalada: ambos sistemas de plantas eléctricas pueden compartir reservas de energía. Así pues, siempre habrá suficiente potencia disponible para arrancar unidades de gran consumo, como los motores propulsores, sin someter a la red eléctrica a grandes fluctuaciones de tensión.

De este modo, el número de motores diésel necesarios también es menor, ya que las unidades individuales pueden ser más grandes, lo que permite reducir el inventario de repuestos y los costos de mantenimiento.

1.1.2. Ahorro de combustible y contaminación ambiental

La reducción de consumo en un sistema de propulsión diésel eléctrico se puede asignar a dos factores principales:

1. El control de velocidad variable de la hélice que reduce al mínimo las pérdidas sin carga de las hélices en comparación con las hélices clásicas de paso variable y velocidad fija.

En una planta diésel eléctrica, el motor de propulsión puede proporcionar en todo momento el par requerido en todo el rango de velocidades, incluso con velocidad cero y en marcha inversa. Por consiguiente, resulta ideal para impulsar una hélice de paso fijo. Esto contribuye a la eficiencia del sistema, es decir, cuando la velocidad del barco es baja, una hélice de paso regulable consume la energía justa para mantener el giro de la misma.

2. La puesta en marcha y parada automática de los motores diésel, lo que garantiza que la carga del motor se mantenga lo más próxima posible a su punto de trabajo óptimo, dentro de los límites de funcionamiento.

En barcos que operan en modo de posicionamiento dinámico, la potencia de propulsión es muy baja la mayor parte del tiempo. Los sistemas de propulsión eléctrica con paso fijo de hélice pueden proporcionar rápidamente un fuerte empuje cuando así se requiere, al tiempo que mantienen fijo, en un mínimo, el consumo de energía.

Además del consumo de combustible, las emisiones de los grandes buques a la atmósfera han pasado a ser un aspecto muy importante, especialmente en áreas ecológicamente vulnerables. Tanto las emisiones como el consumo de un motor diésel, aumentan radicalmente cuando el motor no opera a su velocidad y rango de potencia óptimos.

A efectos prácticos, las ventajas de un sistema híbrido de propulsión frente a uno mecánico directo son evidentes.

El sistema tiene una eficiencia de aproximadamente el 90%, lo que significa que hay otras pérdidas que deben tenerse en cuenta de algún modo.

La variación de pérdidas entre las diferentes tipologías eléctricas es reducida. No obstante, las pérdidas eléctricas son siempre menores en comparación con las pérdidas hidrodinámicas generadas por las hélices y la eficiencia de la combustión en los motores principales. Así pues, se traduce en una reducción de las pérdidas totales del sistema.

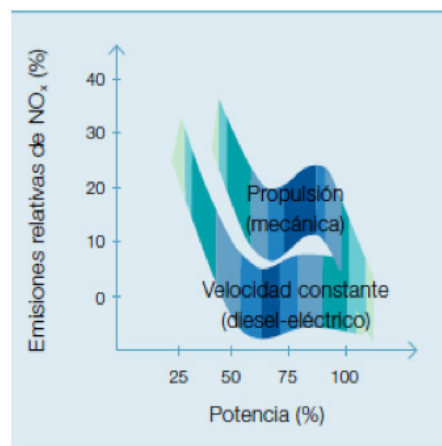


Ilustración 3. Se emite menos NOx si la carga en el motor es alta.
Fuente: Wärtsilä Diésel

En un mundo en el que el ahorro de combustible ya es uno de los requisitos de las compañías navieras, un buque con un sistema integrado eléctrico puede ayudar a recortar su consumo de combustible hasta un 20%, lo que representa una ventaja competitiva considerable —según afirma la revista náutica digital Máquinas de Barcos en su artículo “Propulsión diésel eléctrica. Reducción del consumo y contaminación ambiental” publicado el domingo 7 de abril de 2013—.

1.1.3. Propulsión diésel eléctrica en grandes buques

En la actualidad, los costes de operación diaria de los buques han sobrepasado los costes diarios de la inversión para su construcción. De este modo, es el consumo de combustible el mayor gasto operativo, así como uno de los mayores problemas medioambientales hoy en día.

Ante las crecientes demandas referentes al cuidado medioambiental, un número cada vez mayor de puertos requieren que las embarcaciones allá donde atraquen utilicen combustible de bajo contenido en azufre a fin de reducir las emisiones perjudiciales.

La reducción del consumo de combustible de solo un uno por ciento puede significar un ahorro anual de 50.000 dólares al año para un petrolero mediano y de 300.000 dólares para un portacontenedores de gran tonelaje. Es evidente que, en un futuro próximo, las navieras y astilleros optarán por evolucionar los sistemas de propulsión diésel actuales hacia nuevos sistemas híbridos —como desde hace ya unos años se va incorporando esta tendencia—.

1.1.4. Propulsión diésel eléctrica en embarcaciones de recreo

A diferencia de los grandes buques, el sector de recreo lleva años de retraso en lo que se refiere a instalación de sistemas de propulsión diésel eléctricos. Dichos equipos, apenas se pueden apreciar en grandes mega yates que se acercan más a las dimensiones de un gran buque que a las de una embarcación convencional de recreo. No obstante, que la demanda de sistemas híbridos en embarcaciones de pequeña eslora no haya llegado a su momento cumbre, no significa que el mercado no esté preparado para ello.

Pues desde hace algunos años, aparecen ya algunas empresas comercializando equipos de propulsión eléctricos ideados para este sector. Un ejemplo de ello es la compañía Torqueedo que se inició en el sector con la venta de motores fueraborda únicamente eléctricos y, posteriormente, introdujo sistemas de propulsión intraborda eléctricos.

Existen distintos tipos de propulsores eléctricos intraborda para embarcaciones de recreo. Estos son los más comunes:



Ilustración 4. Propulsor eléctrico tipo POD de 20/25CV. Fuente: Torqueedo



Ilustración 5. Propulsor eléctrico tipo Saildrive de 40CV. Fuente: Torqueedo



Ilustración 6. Propulsor eléctrico de 40/80CV diseñado para acople a eje. Fuente: Torqueedo

Así mismo, surgen en el mercado prototipos de recreo con estos equipos de propulsión eléctricos.

Es el ejemplo del TAVA'E 54 (Ilustración 7), un monocasco del astillero Metal Composite Yachts que pudo apreciarse en la pasada edición del Salón Náutico de Barcelona 2017. Aún como prototipo, con algunos detalles de acabados y mejoras pendientes, optan por la propulsión híbrida con motores eléctricos retráctiles que reducen su resistencia hidrodinámica considerablemente cuando éstos ya no son necesarios.



Ilustración 7. Casco de 15 m de eslora fabricado en aluminio, propulsado por dos motores eléctricos retráctiles.
Fuente: Metal Composite Yachts

Motorización	Híbrida
Producción eléctrica	12V, 24V, 220V y 400V
Motor eléctrico	-
Propulsor	POD eléctricos (x2)
Hélice	Retráctiles de tres palas (x2)
Generación	-

Tabla 1. Especificaciones TAVA'E

Otro claro ejemplo, es el caso del Ro 340Eco (Ilustración 9), del astillero español, Ronáutica Yachts. Modelo que, inicialmente, se ofrecía con el sistema de propulsión diésel convencional. Y que, posteriormente, propuso el modelo híbrido, el cual no tuvo gran éxito comercial, pues su precio final suponía un sobre coste equivalente al 12% aproximadamente del valor total de la embarcación.



Ilustración 8. Motor eléctrico síncrono trifásico de 7,5kW (produce un par de giro similar a un motor diésel de 29CV). Fuente: Bellmarine



Ilustración 9. Ro 340Eco, pionero en su mercado. Fuente: Ronáutica Yachts

Motorización	Híbrida
Producción eléctrica	12V, 220V
Motor eléctrico	Bellmarine 7,5 kW
Propulsor	Tipo SailDrive
Hélice	Plegable de dos palas
Generación	Mastervolt Whisper 6 Ultra

Tabla 2. Especificaciones Ro 340 Eco

2. Capítulo 2. Elección de la embarcación

La aplicación idónea de la planta eléctrica para una embarcación de recreo reside tanto en aquellas que navegan propulsadas en su mayor parte a vela y prescinden del motor, como en aquellas que requieren de una propulsión a velocidad constante y sin grandes fluctuaciones.

En el caso de un sistema de propulsión únicamente eléctrico, su uso se ve principalmente limitado al acceso y salida de puerto. Pues su autonomía depende de la capacidad de almacenaje instalada.

Mientras que un sistema híbrido, no supone limitación alguna de almacenaje de carga, ya que cuenta con un equipo de generación propio donde el consumo de éste es el único limitador. En este caso, la embarcación propuesta para su **refit²**, forma parte del segundo grupo. Se trata pues, de un catamarán de 30 pies de disfrute particular. Es decir, pensado para navegación costera de fin de semana y navegación entre Península y Baleares. La razón, su elevado consumo y limitada autonomía.

El Iroquois 30, diseñado por J.R. (Rod) Macalpine-Downie, fue llevado a construcción por primera vez en 1968 de la mano del astillero Sail Craft Lt. en Reino Unido. Cuenta con una eslora total de 9,14 m y una manga de 4,11 m, y desplaza 2.976 kg. Existen algunas variaciones a lo largo de su cadena de producción.

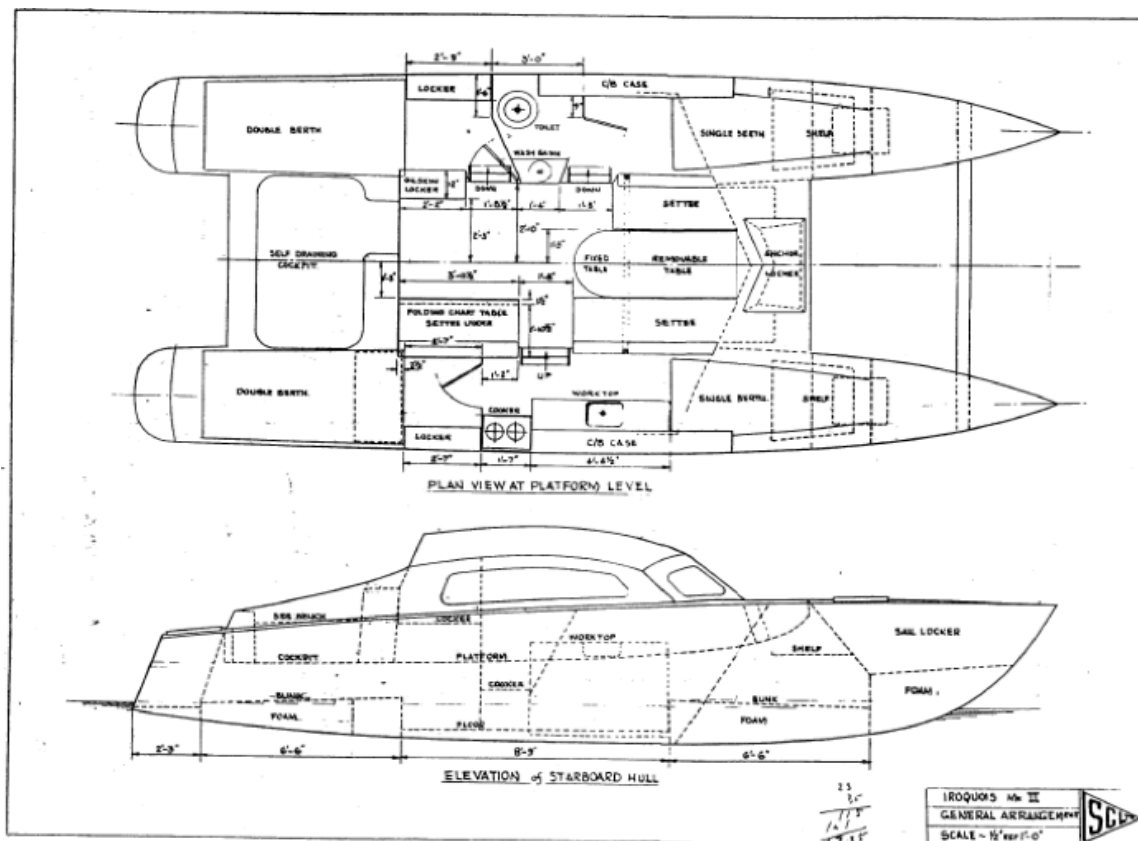


Ilustración 10. Planos en perfil y planta del Iroquois 30. Fuente: desconocida

²**Refit:** reparación, remodelación o reequipamiento.

“As much a true racer as a cruiser, the Iroquois 30 MK II is fast, weatherly, seakindly and tracks assuredly. She has a feather-light helm, a useful sail plan and a tabernacle mast that makes her easy to handle both in and out of the water. Windward ability is excellent, aided by kick-up rudders and pivoting centerboards. One of the handiest and most affordable catamarans in this size range, the Iroquois can still hold her own among the newer designs.” Sailor’s Multihull Guide, 1st Ed., 1994.

El Iroquois 30 MK II, tanto un regatero como un crucero, es rápido, resistente a la intemperie y respetuoso con el medio ambiente. Un casco ligero como una pluma, un plano vélico útil y un mástil pivotante lo hacen fácil de manejar tanto dentro como fuera del agua. La capacidad para remontar barlovento es excelente, gracias a sus timones plegables y orzas antideriva retráctiles. Uno de los catamaranes más prácticos y asequibles de su eslora, el Iroquois, todavía es capaz de mantener su competente línea entre los nuevos diseños.

El modelo sujeto para la remodelación es la versión de casco prolongada, con un añadido de unos 50 cm hacia popa, opción ofrecida por el mismo fabricante (véase en plano de la Ilustración 10).

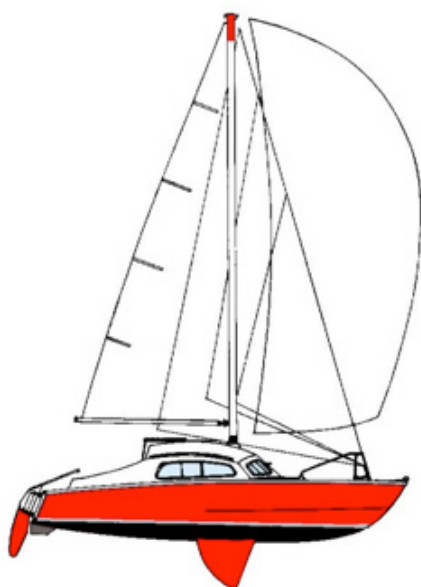


Ilustración 11. Perfil en formato digital con plano vélico.
Fuente: armador del Nofris

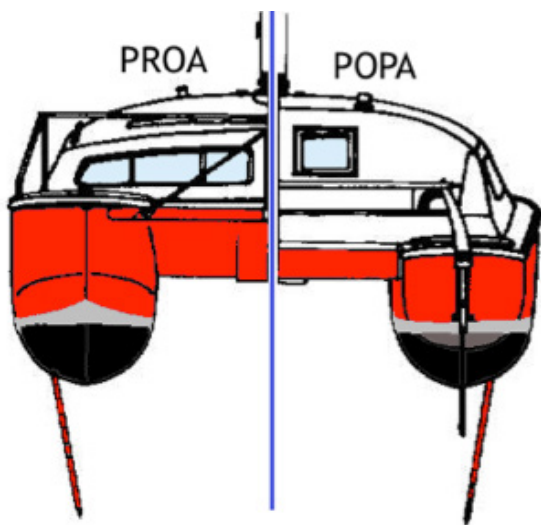


Ilustración 12. Alzado en formato digital. Fuente:
armador del Nofris



Ilustración 13. Nofris, primera varada para su refit. Puerto de Premiá. Fuente: propia

3. Capítulo 3. Estudio económico

Tras estudiar detalladamente la compatibilidad y posibilidad de la instalación del sistema de propulsión intraborda en Nofris, se presupuesta el coste de la nueva instalación. A continuación, se presenta todo el equipo necesario para la instalación, con sus tarifas de mercado:

Componente	Cantidad	Precio (IVA incluido)	Coste total
Propulsor eléctrico E-Tech-2-POD/24V	2	3.468,00 €	6.936,00 €
Hélice 11" 3 palas fija	2	300,00 €	600,00 €
Cableado, terminales, puente de diodos y desconectores de baterías.	1	435,00 €	435,00 €
Baterías (Extras)	4	313,18 €	1.252,72 €
Fibra de vidrio y resina. Imprimación <i>epoxy</i> . <i>Sika</i> y <i>antifouling</i> . Pasacascos, filtros y mangueras.	1	296,78 €	296,78 €
Generador diésel Fischer Panda	1	9.819,15 €	9.819,15 €
Otros materiales: maderas, tornillería inoxidable, etc.	1	100,00 €	100,00 €
Convertidor de DC 24V a DC 12V	1	105,65 €	105,65 €
Cargador AC 230V a DC 24V	1	205,14 €	205,14 €
Mano de obra	230 horas	35 € / h	8.050,00 €
		TOTAL	27.800,44 €

Tabla 3. Componentes de la instalación y costes

El coste final de la remotorización es significativamente elevado teniendo en cuenta que hablamos de un barco de más de 20 años. El hecho principal, a demás del coste de los componentes, es el trabajo en mano de obra que supone la nueva adaptación intraborda. Pues nada que ver tiene con una embarcación actual prediseñada para llevar un sistema de propulsión híbrido de origen, ya estudiado y preparado para su montaje.

Se debe tener en cuenta que los nuevos componentes suponen un aumento considerable de masas. Los motores eléctricos, el generador diésel y los nuevos bancos de baterías, obligan a redistribuir parte de los componentes originales (Ilustración 15), procurando alterar al mínimo el centro de gravedad del barco.

El montaje completo del motor fueraborda supone un peso de 74 kg montado sobre la línea de crujía, mientras que el montaje del generador alcanza los 90 kg. Sin embargo, la masa del generador está prevista de ubicar exactamente un metro a proa de la posición del motor fueraborda. El momento que generan respecto del centro de carena del barco es apenas inapreciable.

Dado que la distribución final de los componentes no está completamente definida hasta la instalación final del generador, su configuración ha sufrido varias modificaciones durante los procesos de construcción y pruebas.

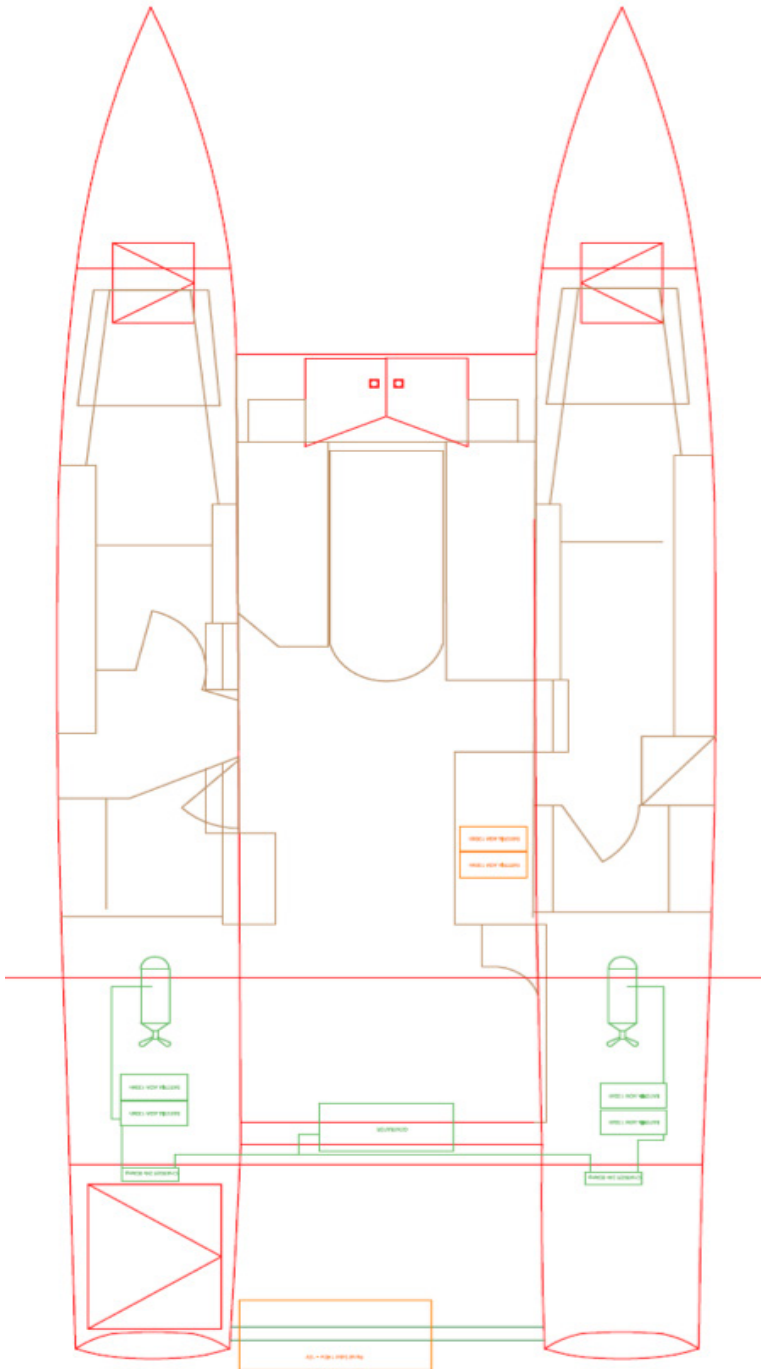


Ilustración 15. Plano en planta AutoCAD. Distribución interior y diseño de la instalación. Fuente: propia

4.2. Especificaciones técnicas de los componentes

4.2.1. Propulsión

Compuesto por dos motores eléctricos de la casa E-TECH, alimentados a 24V, completados con hélices fijas de tres palas.

Marca	E-TECH
Modelo	Motor DC brushless reversible
Voltaje	24V
Potencia	2,2kW (x2)
R.P.M. máximas	1200
Par	12Nm a 70A
Eficiencia	< 90%
Peso	15 kg
Clasificación de seguridad	IP 68
Controlador	Voltaje: 24V Constante: 100A (máx. 130A 3 min)
Fusibles	Corriente principal: 100A Corriente de control: 5A
Dimensiones	

Tabla 4. Especificaciones propulsor E-TECH

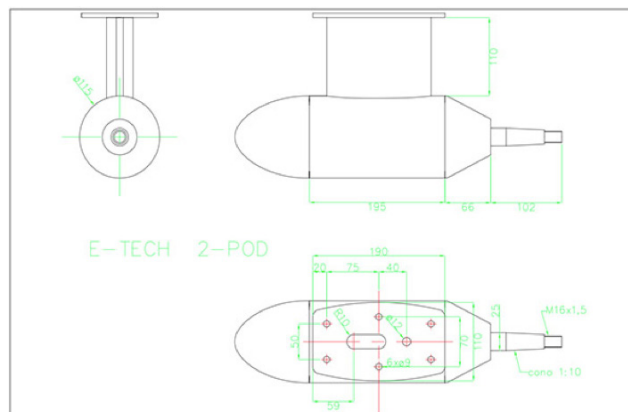


Ilustración 16. Detalle de dimensiones del propulsor. Cotas en milímetros. Fuente: Star Boats.



Ilustración 17. Propulsor E-TECH 2 POD/24V con hélice fija de tres palas. Fuente: Star Boats

4.2.2. Almacenaje

Se redimensiona la capacidad de almacenaje en baterías, aumentando el número a seis baterías, frente a las dos que equipaba originalmente. Especificaciones:

Marca	Victron Energy
Tipo	Deep Cycle GEL
Capacidad	12V / 110Ah
Dimensiones	330 x 171 x 220 mm

Tabla 5. Especificaciones de las baterías

Las baterías de gel Victron Energy instaladas son baterías tipo monoblock selladas que están compuestas por 6 celdas de 2V cada una, entregando una tensión total de 12V. A diferencia de las baterías de plomo convencionales, la tecnología gel proporciona una mayor vida útil, ya que soporta un mayor número de cargas y descargas, llegando los mejores modelos a los 1200 ciclos con descargas del 60%.



Ilustración 18. Batería GEL 12V 110Ah Victron. Fuente: Victron Energy

4.2.3. Generación

El catamarán está equipado con un equipo de generación eólico y fotovoltaico. Estos prolongan, en su cierta medida, la capacidad de descarga de las baterías. Pero, claramente, dada su pequeña capacidad de carga no son suficientes para alimentar el sistema de propulsión.

La fuente principal de generación viene dada por un generador diésel monocilíndrico que tiene las siguientes características:

Modelo	Panda AGT-DC 4000 PMS
Tipo	EA300
Nº Cilindros	1
Diámetro	75 mm
Carrera	70 mm
Desplazamiento Volumétrico	298 cm ³
Potencia nominal	4,0 kW
Potencia máx. (a 3000rpm)	5,1 kW
Tensión nominal	230V \pm 5%
Frecuencia nominal	50Hz \pm 2Hz
Velocidad nominal 50Hz	3000 rpm
Velocidad en vacío	2900 rpm
Holgura de válvulas (motor frío)	0,16 - 0,20 mm
Par motor	58,8 - 63,7 Nm
Capacidad de aceite lubricante	1,3 l
Consumo de combustible⁴	0,42 - 1,12 l / h

Tabla 6. Especificaciones de los propulsores

La ventaja principal de este generador, frente a sus competidores, es su producción directa de corriente continua. Modificando el cableado a la salida del alternador se puede obtener 12V o 24V. En el caso de *Nofris*, su sistema de propulsión trabaja a 24V y su banco de baterías está cableado para suministrar el mismo voltaje. En resumen, es idóneo para su instalación, ya que se suprime un inversor de corriente innecesario en el esquema eléctrico.



Ilustración 19. Generador Fischer Panda AGT-DC 12V PMS. Fuente: Azimut Marine

⁴0,35 l / kW de potencia eléctrica, estos valores oscilan entre el 30% y el 80% de la potencia nominal

F.8.1 Measurements - MPL Capsul

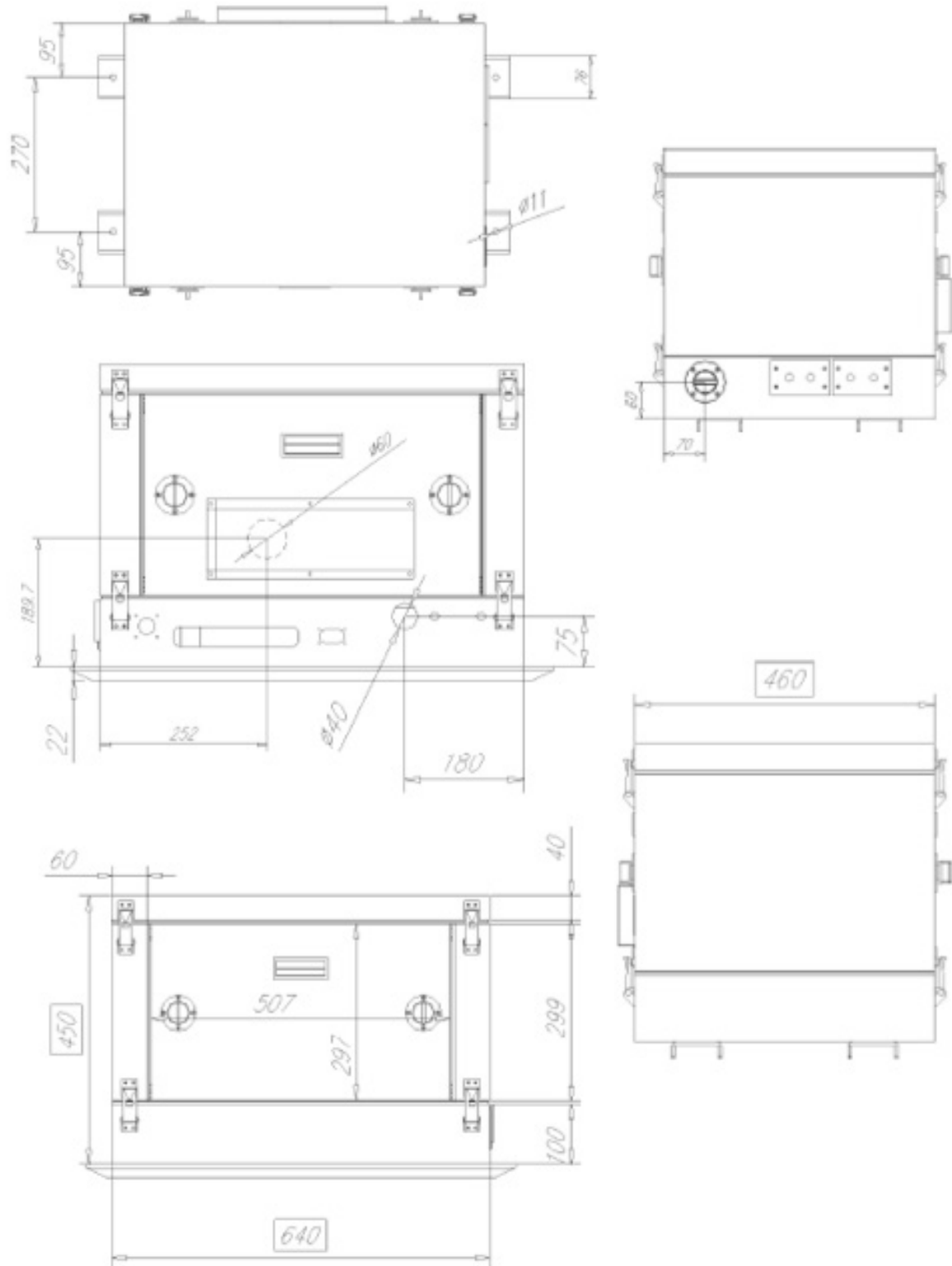


Ilustración 20. Dimensiones Generador Fischer Panda AGT DC 4000 PMS. Cotas en milímetros.
 Fuente: manual de usuario Fischer Panda

4.3. Dimensionado de la instalación

A continuación, se presentan algunos cálculos básicos para dimensionar la instalación. Éstos son: la potencia necesaria para alimentar los propulsores, la capacidad de las baterías y la sección del cableado requerida.

4.3.1. Cálculo de la potencia requerida por la instalación

Al tratarse de una instalación de **corriente continua**⁵, la potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un dispositivo de dos terminales es el producto de la diferencia de potencial entre dichos terminales y la intensidad de corriente que pasa a través del dispositivo. Por esta razón, la potencia es proporcional a la corriente y a la tensión. Esto es:

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = V \cdot I$$

Donde **I** es el valor instantáneo de la intensidad de corriente y **V** es el valor instantáneo del voltaje. Si **I** se expresa en amperios y **V** en voltios, **P** estará expresada en **watts** (vatios). Igual definición se aplica cuando se consideran valores promedio para **I**, **V** y **P**.

Cuando el dispositivo es una resistencia de valor **R** o se puede calcular la resistencia equivalente del dispositivo, la potencia también puede calcularse como:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R}$$

Considerando que, a mayor resistencia, menor corriente.

Así pues, es necesario conocer la potencia o la intensidad consumida / requerida por cada componente de la instalación de 24V:

Componente	Cantidad	Potencia	Intensidad
Propulsor E-Tech 24V	2	2,2kW x2	100A (Máx. 130A 3 min) x2
Convertidor CC 24V a 12V	1	600W	25A
	TOTAL	5kW	285A

Tabla 7. Valores de los consumidores a 24V

Una vez conocida la intensidad máxima puntual (o de pico) que puede llegar a requerir la instalación (285A durante 3 minutos), se puede calcular la potencia máxima que necesitaría para el supuesto caso. Así pues, puede aplicarse:

$$P_{\text{máx}} = V \cdot I = 24V \cdot 285A = 6265W$$

$$P_{\text{máx}} = 6,3kW$$

⁵**Corriente continua:** (abreviatura CC o DC en inglés, de direct current) se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica que no cambia de sentido con el tiempo.

A efectos prácticos, si la instalación se compusiera únicamente de propulsores y generador, éste último debería ser capaz de suministrar 6,3kW para soportar los picos de intensidad de 130A de cada motor trabajando al límite (durante un máximo de 3 min) y, a su vez, con el convertidor de 24V a 12V conectado.

Sin embargo, a efectos reales, los motores tienen un consumo de 100A, cada uno a plena carga, mientras que en régimen de crucero están en torno a los 70A (par máximo). Además, el convertidor es un elemento de uso prescindible a estar permanentemente conectado, pues su función es recargar el circuito de 12V (iluminación y equipos de navegación) como segunda opción a su fuente de generación principal —compuesto por la placa solar y el aerogenerador—.

Por lo tanto, se repite el procedimiento anterior con los propulsores, a efectos de navegación reales, para conocer el consumo eléctrico real de la instalación:

$$P_{\text{crucero}} = V \cdot I = 24V \cdot 140A = 3360W$$

$$P_{\text{crucero}} = 3,4kW$$

Así pues, el generador Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS con una **potencia nominal**⁶ de 4,0kW es el candidato propuesto para la instalación, siendo suficiente la potencia que proporciona para el tipo de navegación de crucero para la cual ha sido rediseñada la embarcación. Pese a no ser recomendable ajustar al límite estos valores, sino que es preferible sobredimensionar la instalación en la medida de lo posible a fin de garantizar su correcto funcionamiento.

Sabiendo que la potencia nominal será la que garantiza el funcionamiento de la instalación, se obtiene a partir de ésta el régimen de trabajo que limita el generador:

$$I = \frac{P_{\text{nominal}}}{V} = \frac{4000W}{24} = 166,6A \sim 160A$$

Un total de 160A será la corriente sostenida capaz de proporcionar el generador, lo que equivale a 80A por propulsor, es decir, el 80% de la capacidad propulsora de los motores.

En otras palabras, el catamarán puede navegar a velocidad de crucero con el generador trabajando al 85% de su capacidad. En su defecto, si se requiere navegar a toda máquina o con el convertidor a su vez, entrarán en uso los dos bancos de baterías de 24V para amortiguar la demanda de corriente.

⁶**Potencia nominal:** potencia máxima que demandada por una máquina o aparato en condiciones de uso normales, es decir, para la cual está diseñado para soportar. Sin embargo, debido a fluctuaciones en la corriente, al uso excesivo o continuo, o en situaciones de uso distintas a las de diseño, la potencia real puede diferir de la nominal, siendo más alta o más baja.

4.3.2. Dimensionado de la capacidad de las baterías

Dado que el sistema propulsor trabaja a 24V, por practicidad, se decide instalar un banco de baterías por cada propulsor. Y, principalmente por razón de espacio, se montan dos baterías de 12V conectadas en serie por cada banco, que hacen un total de cuatro baterías, divididas en dos bancos de 24V.

A petición del armador, se solicita que la embarcación tenga autonomía suficiente para entrar y salir de puerto en modo completamente eléctrico y sin necesidad de utilizar el generador.

Así pues, se estima la maniobra de entrada / salida entre 15-30 minutos en función del puerto, siendo un total de 1 hora redondeando al alza. Por lo tanto, si cada motor consume 100A avante toda, será necesario disponer de un banco que proporcione al menos, 100A por hora. Aun sabiendo que la embarcación no saldrá de puerto a toda máquina, y que un banco de 100Ah sería más que suficiente, se decide sobredimensionar dicha capacidad en un 10% sobre la autonomía solicitada. Por lo que se instalará un banco de 110Ah por cada propulsor.

4.3.3. Dimensionado del cableado

La caída de tensión es igual a la intensidad que circula por el cable multiplicado por la resistencia que ofrece el mismo cable al paso de corriente eléctrica; siendo ésta determinada por el material conductor, la longitud y la sección del cable. Es decir:

$$\Delta U = 2 \cdot R \cdot I = 2 \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Donde **L** es la longitud del cable en metros y **S** la sección de este en milímetros, **I** la intensidad de corriente (A) y **ρ** la resistividad del cable (Ω·mm²·m⁻¹).

La sección del cable vendrá determinada por la normativa alemana DIN VDE 0298-4:2013-06, "Application of cables and cords in power installations. Part 4: Recommended current-carrying capacity for sheathed and nonsheathed cables for fixed wirings in and around buildings and for flexible cables and cords".

La siguiente tabla muestra las secciones según dicta el manual de instalación del generador:

Wiring for vehicle. single phase, not tin-plated, PVC-isolated.		
nominal wire cross-section [mm ²]	allowed continuous current (reference point) ^a	
	at +30°C [A]	at +50°C [A]
1	19	13,5
1,5	24	17,0
2,5	32	22,7
4	42	29,8
6	54	38,3
10	73	51,8
16	98	69,6
25	129	91,6
35	158	112
50	198	140
70	245	174
95	292	207
120	344	244

Ilustración 21. Tabla de secciones de cableado en función de intensidad demandada y temperatura ambiente. Fuente: manual de instalación Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS

Dado que cada motor no requerirá más de 100A, la sección de cable establecida es de 25 mm². Desde la fuente de alimentación —banco de baterías— de cada propulsor hasta el mismo, habrá una distancia máxima de 1,30 m. Y, sabiendo que cada banco tendrá una tensión de 26V a plena carga, se puede calcular así su caída de tensión:

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot \rho \cdot \frac{L}{S} = 2 \cdot 100A \cdot 0,0172\Omega mm^2 m^{-1} \cdot \frac{1,3 m}{25 mm^2}$$

$$\Delta U = 0,178V$$

Una caída de tensión de 0,2V apenas insignificante para el rendimiento de los propulsores.

Del mismo modo, ambas líneas entre el generador y cada banco de baterías estarán compuestas por cable de sección de 25 mm² de una distancia de 3,4 m. Se calcula la caída de tensión para dicho tramo:

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot \rho \cdot \frac{L}{S} = 2 \cdot 100A \cdot 0,0172\Omega mm^2 m^{-1} \cdot \frac{3,4 m}{25 mm^2}$$

$$\Delta U = 0,467V$$

Sabiendo que el generador da una tensión nominal de 24V y que la caída de tensión es de 0,47V se obtiene en el borne de entrada del banco de cada propulsor una tensión de 23,53V. Ésta pequeña pérdida es corregida por un controlador VCS (Voltaje Control System) que viene suministrado con el generador y se encarga de variar la frecuencia de éste hasta recuperar la tensión inicial.

4.3.4. Cálculo de autonomía

Se proponen cuatro situaciones: autonomía a velocidad de crucero (70A) y a régimen máximo (100A), en modo híbrido (generador más baterías) y modo únicamente eléctrico (baterías).

Los cálculos se basarán en la capacidad de 120 litros del tanque combustible y en la capacidad de 110Ah de banco de baterías para cada motor.

1. Modo eléctrico a velocidad de crucero (70% de potencia):

$$Autonomía = \frac{Capacidad\ batería\ (A \cdot h)}{Consumo\ eléctrico\ propulsores\ (A)} = \frac{110\ Ah}{70A}$$

$$A = 1,57h \sim 1h\ 34\ min$$

2. Modo eléctrico a velocidad máxima (100% de potencia):

$$Autonomía = \frac{Capacidad\ batería\ (A \cdot h)}{Consumo\ eléctrico\ propulsores\ (A)} = \frac{110\ Ah}{100A}$$

$$A = 1,1h \sim 1h\ 06\ min$$

Para calcular la autonomía con el generador en funcionamiento se recurre a la tabla de consumos, elaborada a partir de la regresión lineal de los valores extraídos de la ficha técnica del fabricante.

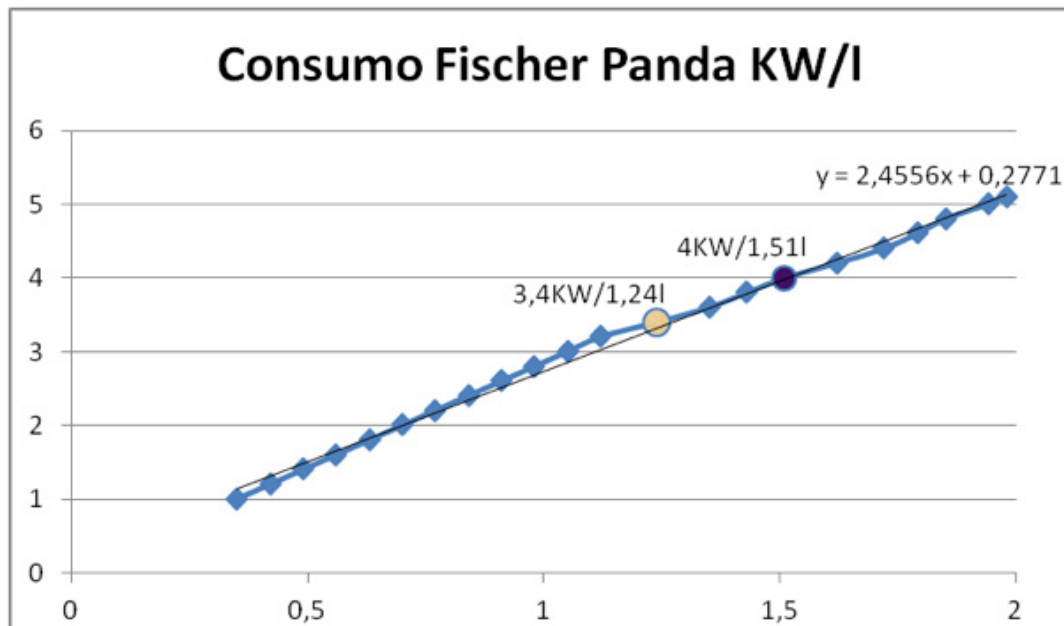


Ilustración 22. Gráfica de consumo del generador en kW/l con los valores de velocidad crucero y máxima destacados. Fuente: propia

3. Modo híbrido a velocidad de crucero (70% de potencia):

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad tanque combustible (l)}}{\text{Consumo del generador a } V_{\text{crucero}} \left(\frac{l}{h} \right)} + \text{Autonomía modo eléct. } V_{\text{crucero}}(h)$$

$$A = \frac{120 l}{1,24 l/h} + 1,57 h = 96,77 h + 1,57 h$$

$$A = 98,34 h \sim 98 h 20 min$$

4. Modo híbrido a velocidad máxima (100% de potencia):

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad baterías (A·h)} + \text{Capacidad máx.sostenida generador (A·h)}}{\text{Consumo eléctrico propulsores a } V_{\text{máx.}}(A)} = \frac{110 Ah + 80 Ah}{100 A}$$

$$A = 1,9 h \sim 1 h 54 min$$

Una vez consumida la corriente requerida para navegar adelante toda durante 1 h 54 min, la embarcación podrá seguir navegando a velocidad de crucero con 117 l de gasoil en el tanque. Esto le confiere una nueva autonomía de 94 h 21 min.

	Velocidad Crucero (70A)	Velocidad Máxima (100A)
Eléctrico	1 h 34 min	1 h 06 min
Híbrido	98 h 20 min	1 h 54 min + 94 h 21 min (a 70A)

Tabla 8. Resumen de autonomía de la nueva instalación.

5. Capítulo 5. *Refit*

5.1. Instalación del sistema de propulsión

Inicialmente, el catamarán estaba dispuesto para ser propulsado mediante un motor fueraborda a gasolina de 20 caballos original de la marca Parsun. Estaba ubicado en el travesaño que une ambos patines por popa con intención de suprimir el engorroso motor que ocupa parte de la habitabilidad en bañera.

El nuevo sistema de propulsión está compuesto por dos propulsores de tipo **POD**⁷ que van ubicados directamente sobre la obra muerta. Se reacondicionan los 3 metros de casco desde el espejo del tambucho de popa en adelante. Se sanea la superficie interior, se lija y se lamina de nuevo añadiendo una lámina de panal de abeja (Ilustración 24), a modo de dar espesor al casco (hasta 0,5 cm extra) —especialmente en el asentamiento de los propulsores—. No se trata de una necesidad estructural, sino por razón de seguridad ya que el casco presenta un antiguo estado de **osmosis**⁸ previamente reparada (Ilustración 23). El montaje de los propulsores es atornillado y encolado con polímero, a través del casco, sobre un grueso de 5 mm de aluminio en su interior que trabaja como sándwich, repartiendo el esfuerzo sobre la superficie interior del casco (Ilustración 26).



Ilustración 23. Estado inicial del casco. El patín de estribor presenta partes translúcidas en las zonas de la fibra afectadas por la osmosis. Fuente: propia



Ilustración 24. Relaminado interior de la sala de máquinas, en tipo sándwich con panel de abeja y fibra de vidrio multidireccional. Fuente: propia

⁷**POD:** Unidad de impulsión marina que consiste en una hélice de paso fijo montada sobre una góndola donde se encuentra conectada directamente al eje del motor. Libre de transmisiones tradicionales tales como Z-drive y L-drive.

⁸**Ósmosis** u osmosis (del griego ομός ōsmós ‘acción de empujar’, ‘impulso’ y -sis) fenómeno físico relacionado con el movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable. Tal comportamiento supone una difusión simple a través de la membrana, sin gasto de energía.

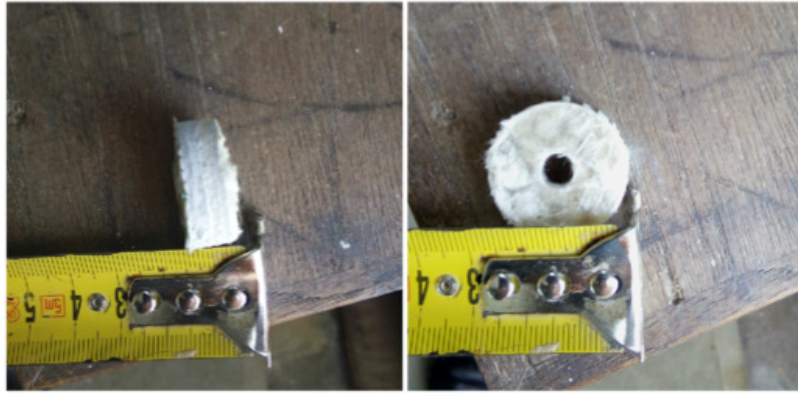


Ilustración 25. Detalle del taladro para pasar el cableado del propulsor. Puede apreciarse el espesor original del casco de 1,5 cm aumentado a 2 cm finalmente. Fuente: propia



Ilustración 26. Detalle del ensamblaje interior del propulsor, montaje sobre pletina de aluminio acoplada mediante seis tornillos roscados de M9 y sellado con polímero Sika 291i. Fuente: propia

Tras laminar el interior del casco se fabrican dos cuadernas por casco (Ilustración 27) para reforzar estructuralmente los espacios de alojamiento de los propulsores y las baterías. En otras palabras, se delimita el espacio del compartimento de máquinas por cuadernas, a la vez que se refuerza toda su superficie. Concluyendo así, en dos salas de máquinas estancas y aisladas del habitáculo, exactamente idénticas (Ilustración 28).



Ilustración 27. Cuadernas de fibra de vidrio fabricadas en sándwich con panel de abeja e inyección de resina por vacío. Fuente: propia

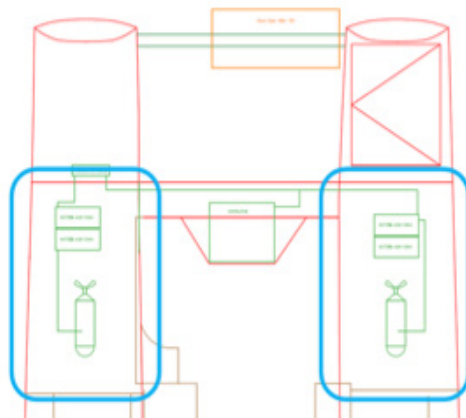


Ilustración 28. En azul, salas de máquinas delimitadas por cuadernas y relaminadas. Fuente: propia

Por la parte exterior, se lija el área de la obra viva donde irán ubicados los propulsores a modo de retirar las capas de patente previas hasta alcanzar al *Top Coat*, dejando una zona lisa y homogénea sobre la cual sellar el propulsor al casco. Una vez acoplados los propulsores, se eliminan los restos de polímero sobrantes y se aplica una mano de imprimación *epoxy* al conjunto, para recibir posteriormente una nueva capa de *antifouling*.



Ilustración 29. Secuencia de montaje y acabado del propulsor de babor. Fuente: propia

5.2. Instalación del generador

Debido a su considerable tamaño y por razones acústicas, la presunta instalación del generador en el interior de la embarcación queda inicialmente descartada. Éste será ubicado estratégicamente en bañera, junto al carro escotero de mayor y la caña. Ofreciendo una doble funcionalidad como asiento, para mayor confort en el gobierno del catamarán.

Originalmente, el tanque de combustible ubicado en la aleta de babor, comportaba el almacenaje de gasolina de 95 octanos para el motor fueraborda. Con una capacidad de 120 litros y fabricado en plástico, su estado de conservación es notable. Por lo que se decide sanear el tanque, secarlo y aspirar los residuos sólidos que quedan en su interior. Dándole así, una segunda vida como tanque de gasoil para alimentación del nuevo generador diésel.



Ilustración 30. Planteamiento de la ubicación del generador, utilizando un depósito de cotas prácticamente similares. Fuente: propia



Ilustración 31. Tambucho de popa babor, con gran capacidad de estiba, aloja también el tanque de combustible. Fuente: propia



Ilustración 32. Tanque de combustible de 120 litros. Fuente: propia

Por razones de presupuesto, la instalación del generador se ve obligada a posponerse hasta septiembre de 2018, donde se instalará sobre una bancada debidamente empotrada en bañera. Además, se realizará el montaje de la toma de mar para la refrigeración de este, así como su correspondiente salida de escape.

5.3. Instalación del banco de baterías

Se añadirán dos soportes en tablero marino por cada banco de baterías, a escasos centímetros de los propulsores, que junto con cuatro cinchas de fijación, completan el trincado de las baterías.



Ilustración 33. Banco de 24V del propulsor de estribor a falta de trincar.
Fuente: propia



Ilustración 34. Propuesta de cajón de madera y fijación por cinchas.
Fuente: Fondear

5.4. Instalación de los componentes y cableado

Dado que el montaje del generador queda aplazado, actualmente la única posibilidad de cargar las baterías del sistema de propulsión es mediante un cargador a 230V. Cuando el barco está conectado a tierra, instalado junto al panel de instrumentos temporalmente, hasta ser ubicado en el tambucho de popa estribor cuando se complete la instalación.



Ilustración 35. Cargador TBS Omniccharge 24V/30A durante su colocación temporal junto con las baterías de servicios.
Fuente: propia

Los reguladores de potencia de los motores eléctricos irán ubicados en cada una de las salas de máquinas, montados en vertical sobre las cuadernas de proa.



Ilustración 36. Regulador de potencia del propulsor de estribor, con su conexión finalizada, a falta de empotrar en la cuaderna de la sala de máquinas.
Fuente: propia

El mando acelerador de los propulsores irá montado sobre la cabina, ya que permite maniobrar la embarcación desde su eje de crujía ofreciendo una visión completa de 360°. Los bombines de contacto y los tacómetros irán ubicados en su cercanía, junto a los instrumentos de navegación, aportando una lectura completa de información para la navegación.



Ilustración 37. Planteamiento del mando acelerador durante las pruebas de mar. Fuente: propia

El puente de diodos se instalará a la par que el generador, en lugar intermedio, entre éste y el cargador de 230V.

Mientras que el controlador de baterías Victron Energy se ha ubicado en el panel de instrumentos, conectado con su carga resistiva conocida junto a las baterías, permite monitorizar el consumo instantáneo del sistema propulsor.



Ilustración 38. Controlador de baterías Victron Energy compuesto de pantalla multifunción y shunt. Fuente: propia

5.5. Otras modificaciones

Se reacondicionan también el interior del casco de debajo de cada una de las literas de proa. Laminado en resina de poliéster con fibra de vidrio, tejida de alto gramaje multidireccional. Este nuevo espacio reacondicionado alojará un depósito de agua de 75 litros. Pues, actualmente, Nofris no dispone de reservas de agua potable.

Además, se retira la antigua regala de madera, ya podrida por el paso de los años, y en su lugar se propone sanear toda la superficie y añadirle unas pequeñas tiras de tejido de fibra de vidrio laminadas para garantizar la estanqueidad de la unión de cubierta y casco. Para terminar, se vuelve a lijar la superficie laminada y se le aplica una mano de masilla epoxy para disimular las irregularidades, a la espera de una mano de pintura para finalizar el acabado.



Ilustración 39. Relaminado de la superficie de casco bajo la litera de proa babor. Fuente: propia



Ilustración 40. Proceso de nivelado de la regala rellenando con masilla epoxy tras el enfibrado previo. Fuente: propia

6. Capítulo 6. Plan de mantenimiento

En comparación con el motor fueraborda, el mantenimiento del sistema propulsivo es significativamente más complejo en cuanto a componentes, pero a su vez mucho más sencillo de revisar. Además, se reduce su coste de mantenimiento final, no solo los repuestos son más económicos, sino que a efectos de mano de obra es donde mayor diferencia puede apreciarse —p. ej. sustituir la turbina de refrigeración del motor fueraborda son 40 min, mientras que en el generador apenas son 10 min—.

A continuación, se presenta un plan de mantenimiento que engloba todos los componentes de la nueva instalación y, a su vez, una comparativa con el mantenimiento del motor fueraborda.

Inspección			Periodo						
Componente	Fischer Panda / Propulsor E-TECH	Parsun 20HP	10h	50h	100h	200h	500h	1000h	5000h
Aceite motor	Sustituir	Sustituir	○	○	● ●				
Aceite transmisión	N/A	Sustituir	○		●				
Ánodo cola/POD	Sustituir	Sustituir		○	●		●		
Ánodo interno	N/A	Sustituir				●			
Bujía	N/A	Limpiar / Sustituir				●			
Cable acelerador y holgura	N/A	Comprobar / Ajustar				●			
Carcasa o tapa	Comprobar	Comprobar				● ●			
Circuito de combustible	Comprobar / Limpiar	Comprobar / Limpiar	○	○ ○	● ●				
Cojinete del rotor del generador	Comprobar / Sustituir	N/A						●	
Compresión	Comprobar	Comprobar						● ●	
Correa/s	Ajustar / Sustituir	Ajustar / Sustituir		○	●		●		
Corriente con carga	Comprobar	N/A		○	●				
Depósito combustible	Comprobar / Limpiar	Comprobar / Limpiar				●	●		
Filtro de aceite	Sustituir	Sustituir				●	●		
Filtro de agua salada	Limpiar	N/A			●				
Filtro de aire	Sustituir	Limpiar			○ ●		●		
Filtro de combustible	Sustituir	Comprobar / Limpiar	○	○	○ ●		●		
Hélice y pasador	Comprobar	Comprobar / Sustituir		○	●		●		

Inspección			Periodo						
Componente	Fischer Panda / Propulsor E-TECH	Parsun 20HP	10h	50h	100h	200h	500h	1000h	5000h
Inspección Visual: - Revisar niveles - Fugas - Apriete de tornillería - Apriete de bridas manguitos - Corrosiones - Ánodos - Líneas de combustible - Estado cableado eléctrico	Comprobar / Ajustar / Limpiar / Sustituir	Comprobar / Ajustar / Limpiar / Sustituir	○ ○	● ●					
Junta tapa de balancines	Sustituir	Comprobar / Sustituir		○			● ●		
Manguitos / conductos de refrigeración	Sustituir	Limpiar		○	●				●
Prefiltro de combustible	Sustituir	Sustituir		○	○ ●		●		
Puntos de engrase	N/A	Engrasar			●				
Ralentí	Comprobar	Comprobar / Ajustar	○	○	● ●				
Reglaje válvulas	Comprobar / Ajustar	Comprobar / Ajustar		○			● ●		
Sensor presión de aceite	Comprobar / Sustituir	Comprobar / Sustituir		○ ○		●	●		
Sensor temperatura escape	Comprobar / Sustituir	N/A		○			●		
Sensor temperatura refrigeración	Comprobar / Sustituir	Comprobar / Sustituir		○ ○		●	●		
Silentblocks de bancada	Comprobar / Sustituir	N/A		○	●				
Temperatura refrigerante de salida con carga	Medir	N/A		○	●				
Temperatura refrigerante de entrada con carga	Medir	N/A		○	●				

Inspección			Periodo						
Componente	Fischer Panda / Propulsor E-TECH	Parsun 20HP	10h	50h	100h	200h	500h	1000h	5000h
Termostato	Comprobar / Sustituir	Comprobar / Limpiar / Sustituir			○		●	○	●
Inyector	Comprobar / Sustituir	N/A						○	●
Turbina refrigeración (<i>impeller</i>)	Sustituir	Sustituir				● ●			
Varilla de cambio	N/A	Comprobar / Ajustar				●			
VCS	Comprobar funcionamien- to	N/A		○	●				
Voltaje con carga	Medir	N/A		○	●				
Voltaje sin carga	Medir	N/A		○	●				
Retenes POD	Sustituir	N/A						●	
Baterías	Medir / Sustituir	N/A					●		

Tabla 9. Comparativa de plan de mantenimiento motor fueraborda y sistema híbrido

- Inspección inicial
- Inspección periódica

7. Capítulo 7. Pruebas de mar

El 16 de marzo de 2017 se realiza la botadura de la embarcación por primera vez tras su *refit*. En condiciones de viento de 14 nudos de componente E y ola de frecuencia corta de 0,4 metros.

Se efectúa una navegación de transporte desde el Varadero de Premiá hasta el Club Náutico El Balís, efectuando la travesía a vela y la salida y entrada a puerto en modo eléctrico. Navegando a 3,4 nudos saliendo de puerto a 720 rpm. Tras la llegada a puerto de destino, durante la maniobra de aproximación al amarre, resulta imposible invertir el giro de los propulsores para detener la embarcación, por lo que termina frenando afectuosamente gracias al pantalán con unas defensas de por medio.



Ilustración 41. Botadura Nofris, varadero de Premiá. Fuente: propia

Se analiza toda la travesía, estudiando al detalle el atraque, incluso se comenta con el fabricante de los propulsores lo sucedido. Llegando a la conclusión que los propulsores en posición neutra, si la embarcación navega con inercia y las hélices siguen girando, por seguridad no permite invertir el sentido de giro. Un fallo de configuración que se corrige cambiando algunos parámetros con el ordenador conectado al controlador de los propulsores. El sistema permite múltiples configuraciones de funcionamiento.

Configuration		Pin Status			Running Status
Forward Switch	Foot Switch	FWD_SW (12)	REV_SW (14)	Foot (15)	
Enable	Disable	OFF	OFF	x	Neutral
		OFF	ON	x	Reverse
		ON	OFF	x	Forward
		ON	ON	x	Neutral
Disable	Enable	x	OFF	OFF	Can't operate
		x	ON	OFF	Can't operate
		x	ON	ON	Reverse
		x	OFF	ON	Forward
Disable	Disable	x	OFF	x	Forward
		x	ON	x	Reverse

Note: X means can be on or off

Ilustración 42. Configuración por defecto del controlador de los propulsores. Fuente: Manual de usuario Kelly KLS-S Brushless Motor Controller



Ilustración 43. Reprogramación de los parámetros del controlador. Fuente: Kelly KLS Configuration Program

A día 2 de abril de 2018, se realiza la segunda **prueba de mar**⁹, en condiciones de navegación idóneas: sutil mar de fondo y sin apenas viento de componente SE. El estado del casco es sucio, casi un año desde la última varada.

⁹**Prueba de mar:** Serie de comprobaciones que se realizan a un buque en mar abierto para comprobar su desempeño tras finalizar su construcción en el astillero.

Se instalan cuatro baterías, de 105Ah cada una, para garantizar más de dos horas de autonomía si así lo requieren las pruebas. La capacidad de maniobra, especialmente en ciaboga, es sorprendente. Previo a cualquier medición, se efectúa la prueba de invertir el sentido de giro de los propulsores tras navegar avante toda —la prueba se realiza con el motor fueraborda, aún instalado, arrancado en punto neutro para actuar en caso de emergencia—. El resultado es satisfactorio.

Solventados los fallos de configuración, se procede a realizar distintas pruebas de propulsión a diferentes regímenes de revoluciones, tomando así valores de velocidad en nudos y consumo en amperios.



Ilustración 44. Algunos valores obtenidos, a velocidad de crucero y velocidad máxima. Fuente: propia

Por último, se realiza un análisis filmográfico a distinto régimen de giro de los propulsores para valorar su funcionamiento a nivel visual y estudiar la posible cavitación, si es que existe.



Ilustración 45. Instantánea del video del funcionamiento del propulsor de babor tras un año sumergido. Fuente: propia

Ilustración 46. Equipo de filmación compuesto por una cámara sumergible y el bichero de a bordo. Fuente: propia

8. Capítulo 8. Análisis de resultados

Valores obtenidos en las pruebas de mar, consumo por motor:

	Consumo (Amperios)	RPM	Velocidad (Nudos)
	30	510	1,1
	40	560	1,5
	50	600	1,9
	60	630	2,2
Vcrucero	70	650	2,5
Vmáx. Generador	80	680	2,7
	90	710	2,9
Vmáx. Propulsor	102	730	3,1

Tabla 10. Valores de amperímetro, tacómetro y GPS medidos en la segunda prueba de mar

A través de la tabla de resultados obtenida, se obtiene la gráfica amperios / nudos, o lo que es mejor kW / nudo aplicando: $P = V \cdot I$, recordando duplicar la intensidad para que el consumo sea el de ambos propulsores.

Teniendo la gráfica de consumos kW por litro, empleada con anterioridad en el Capítulo 5.3.1, podemos añadir a la tabla los consumos para cada velocidad.

	Potencia (kW)	Velocidad (Nudos)	Consumo (Litros)
	1,44	1,3	0,52
	1,92	1,5	0,68
	2,4	1,9	0,84
	2,88	2,2	0,99
Vcrucero	3,36	2,5	1,24
Vmáx. Generador	3,84	2,7	1,43
	4,32	2,9	1,51
Vmáx. Propulsores¹⁰	4,896	3,1	1,51

Tabla 11. Consumos de potencia y litro obtenidos a raíz de la Tabla 10

¹⁰El consumo a partir de 4kW es sostenido, ya que es la potencia nominal que puede suministrar el generador. La potencia restante provendrá del almacenaje de las baterías.

Se obtiene la gráfica:

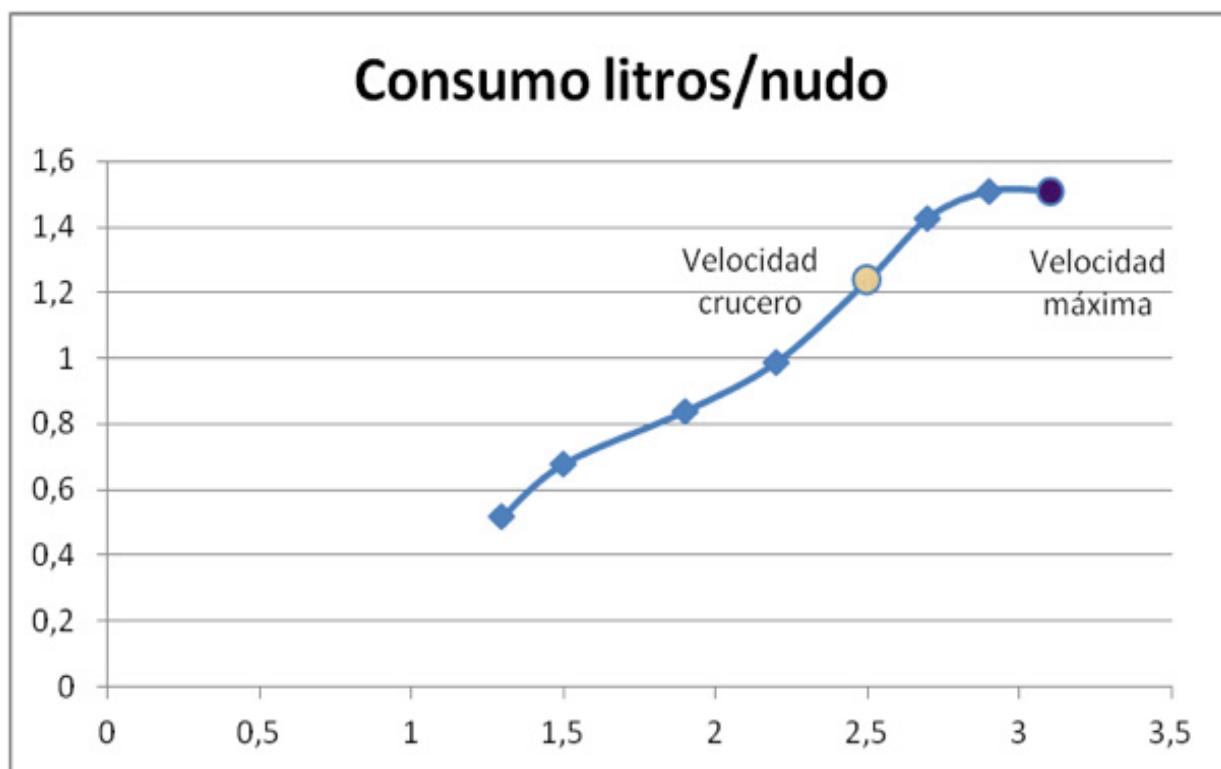


Ilustración 47. Gráfica de consumo litros por nudo. Elaboración: propia

A efectos prácticos, el consumo del generador respecto del motor fueraborda supone un ahorro de combustible del 72,4% a velocidad de crucero y del 82,4% a velocidad máxima. La eficiencia del sistema híbrido es destacable.

9. Conclusiones

Tras analizar los resultados de las pruebas de mar, se puede afirmar que el sistema híbrido es una mejora sustancialmente considerable para la propulsión de este caso de embarcación de recreo. Aunque, por otra parte, durante las mismas pruebas se ha podido determinar que las revoluciones máximas de giro de los propulsores no superan las 800rpm con carga y que la velocidad máxima en nudos de la embarcación apenas alcanza los 3 nudos frente a los 5,5-6 nudos a los que le permite navegar el motor fueraborda. Dos puntos débiles en proceso de mejorar, que según parece:

- Las rpm máximas del propulsor pueden ajustarse mediante la configuración de controlador para ambos propulsores.
- La velocidad máxima de tres nudos, se ve limitada por un fallo de configuración, por el cual el sentido de giro de los motores no corresponde con el montaje de las hélices de dextrógira y levógira.

Por último, se deciden algunas modificaciones para la distribución final de algunos equipos. Como reubicar el tanque de combustible en el tambucho de popa estribor, instalar el generador en el tambucho de popa babor, instalar dos tanques de 75 litros de agua en las sentinas de los camarotes de proa, así como desplazar los bancos de baterías de los propulsores también a las sentinas de proa. Por último, trasladar las dos baterías de servicios bajo la mesa del comedor, justo en la base del mástil.

Así pues, el balance de la nueva instalación queda de la siguiente manera:

Ventajas	Inconvenientes
Menor consumo	Inversión inicial mayor
Mayor autonomía	Plan de amortización más largo
Menor contaminación ambiental	Instalación más compleja
Mayor espacio de habitabilidad en bañera	Incremento del peso total de la instalación
Menor mantenimiento	Potencia total instalada menor 4,4kW vs. 14,7kW
Mayor capacidad de maniobra	Menor velocidad punta

Tabla 12. Ventajas e inconvenientes de la instalación híbrida

10. Bibliografía

- J.D.K. Wilson. *Medidas de ahorro de combustible y de costos para armadores de pequeñas embarcaciones pesqueras: 383 (FAO Documentos Técnicos de Pesca y Acuicultura)*. 10ª ed. Food & Agriculture Organization of the United Nations, 15 de mayo de 2005. ISBN 9253042230
- Enrique Casanova Rivas. *Máquinas para la propulsión de buques*. Universidad de A Coruña, 2001. ISBN 9788495322968
- Roberto Faure Benito. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. F.E.I.N, 7 de febrero de 2001. ISBN 9788492175079
- Manuel Figueras. *Electricidad del barco*. 1ª ed. Tutor, 2008. ISBN 9788479027209
- Azimut Marine. *Generadores diésel - Generación eléctrica - Electricidad*. [Consultado el 9 de septiembre de 2017]. Disponible en: <<https://www.azimutmarine.es/electricidad/generacion-electrica/generadores-diesel.html>>
- Bellmarine. *Sailmaster Ultimate electric saildrive system*. [Consultado el 27 de abril de 2017]. Disponible en: <<http://www.bellmarine.nl/?nr=67>>
- Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación de la Universidad de Oviedo. 2008. *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco*. [Consultado el 18 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.investigacion-ffe.es/documentos/enertrans/EnerTrans_Consumos_barco.pdf>
- Multihull Dynamics, I. 2007. *Iroquois 30 MK II Custom Evaluation*. [Consultado el 9 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://www.multihulldynamics.com/news_article.asp?articleID=100>
- Norberto Sánchez. *Máquinas de Barcos: Propulsión Eléctrica en los Buques (IV)*. [Consultado el 7 de mayo de 2017]. Disponible en: <<http://maquinasdebarcos.blogspot.com.es/2008/12/propulsin-elctrica-de-buques-iv.html>>
- Norberto Sánchez. *Máquinas de Barcos: Propulsión diesel eléctrica. Reducción del Consumo y la Contaminación Ambiental*. [Consultado el 28 de noviembre de 2017]. Disponible en: <<http://maquinasdebarcos.blogspot.com.es/2013/04/propulsion-diesel-electrica-reduccion.html>>
- Star Boats. 2015. *E-Tech-2-POD/24V*. [Consultado el 3 de noviembre de 2017]. Disponible en: <<http://starboats.eu/e-tech-electric-drives/e-tech-2-pod24v/>>
- Suso Pérez. 2018. *El velero que no contamina*. [Consultado el 14 de enero de 2018]. Disponible en: <<http://www.lavanguardia.com/deportes/otros/20081111/53577182034/el-velero-que-no-contamina.html>>
- Victron Energy. *Baterías Gel y AGM*. [Consultado el 8 de febrero de 2017]. Disponible en: <<https://www.victronenergy.com.es/batteries/gel-and-agm-batteries>>

10. Bibliografía

- Yuri Drozd. 2016. *Propulsión híbrida diésel-eléctrica en barcos de recreo*. [Consultado el 22 de noviembre de 2017]. Disponible en: <<https://proyectosnavales.com/2016/07/17/propulsion-hibrida-diesel-electrica-en-barcos-de-recreo/>>
- Efficiency delivers marketability. [Consultado el 19 de enero de 2018]. Disponible en: <http://shippingefficiency.org/sites/shippingefficiency.org/files/casestudies/Danaos_Casestudy.pdf>
- Metal Composite Yachts. *The weight of the vast majority of yachts is too important to allow speed sailing*. [Consultado el 20 de abril de 2017]. Disponible en: <<http://www.metalcompositemyachts.com/en/tavae/performance>>
- Torqueedo. Sistemas de propulsión POD, eléctricos para veleros y lanchas. [Consultado el 16 de mayo de 2017]. Disponible en: <<https://www.torqueedo.com/es/productos/motores-pod>>

11. Anexos

Anexo 1. Consumos específicos año 2000.

Consumos específicos (g/kWh)			
Tipos de buques	Crucero	Maniobra	Puerto
Tanques	210	230	
Bulkcarriers	203	223	
Carga general	202	222	
Porta contenedores	199	219	
Ro-Ro	210	230	
Pasajeros	217	227	227

Datos del documento *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community European Commission*, ENTEC 2002, se obtiene para el año 2000 los anteriores consumos específicos del motor propulsor por tipo de buque y etapa (consumiendo fuel oil).

Anexo 2. Comparativa de consumos Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS y Parsun F20HP

Gráficas obtenidas a partir de valores estudiados o calculados según especificaciones del fabricante. Destacan los valores de velocidad de crucero y velocidad máxima, para cada propulsor. Asignando el 75% de las RPM máximas para el motor fueraborda (3/4 del recorrido del acelerador) y el 70% de la potencia que requieren los propulsores eléctricos.

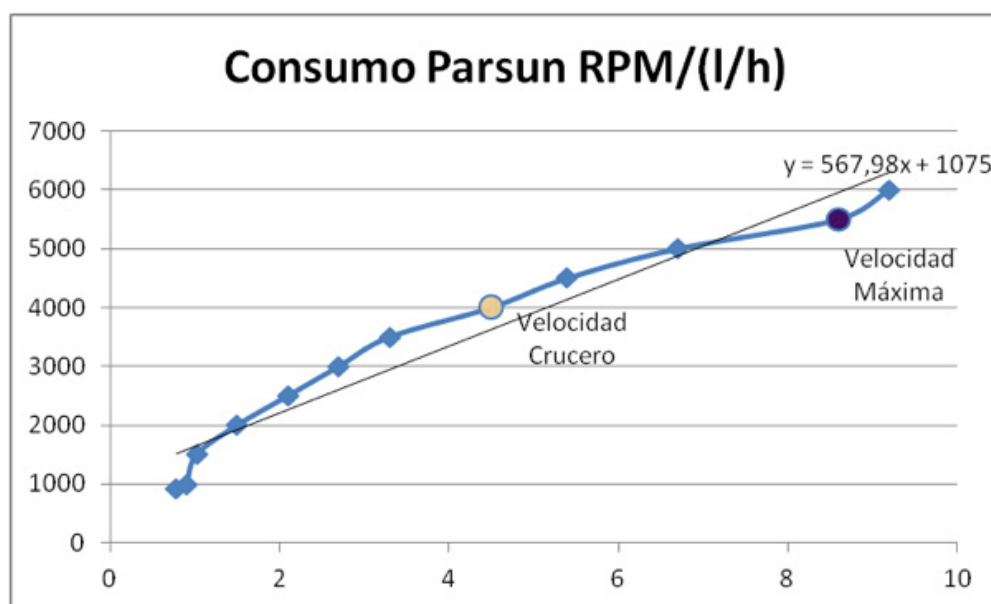


Ilustración 48. Gráfica de consumo RPM/litro. Obtenida a partir de valores de consumo ofrecidos por Boat Fuel Economy. Elaboración: propia.

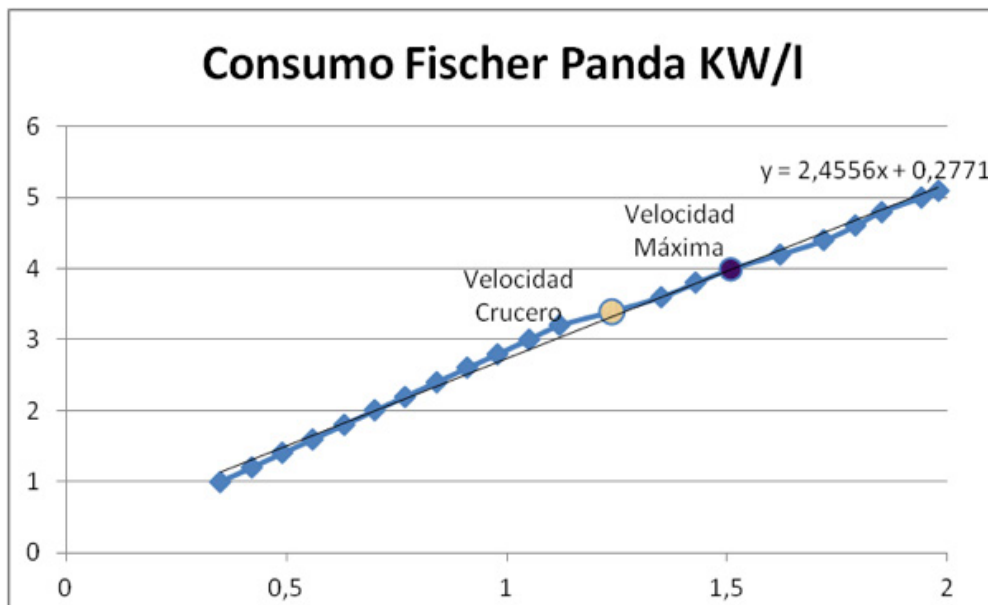


Ilustración 49. Gráfica de consumo kW/litro. Obtenida mediante regresión lineal de los consumos ofrecidos por el fabricante Fischer Panda. Elaboración: propia.

Anexo 3. Plano de instalación eléctrica propulsores

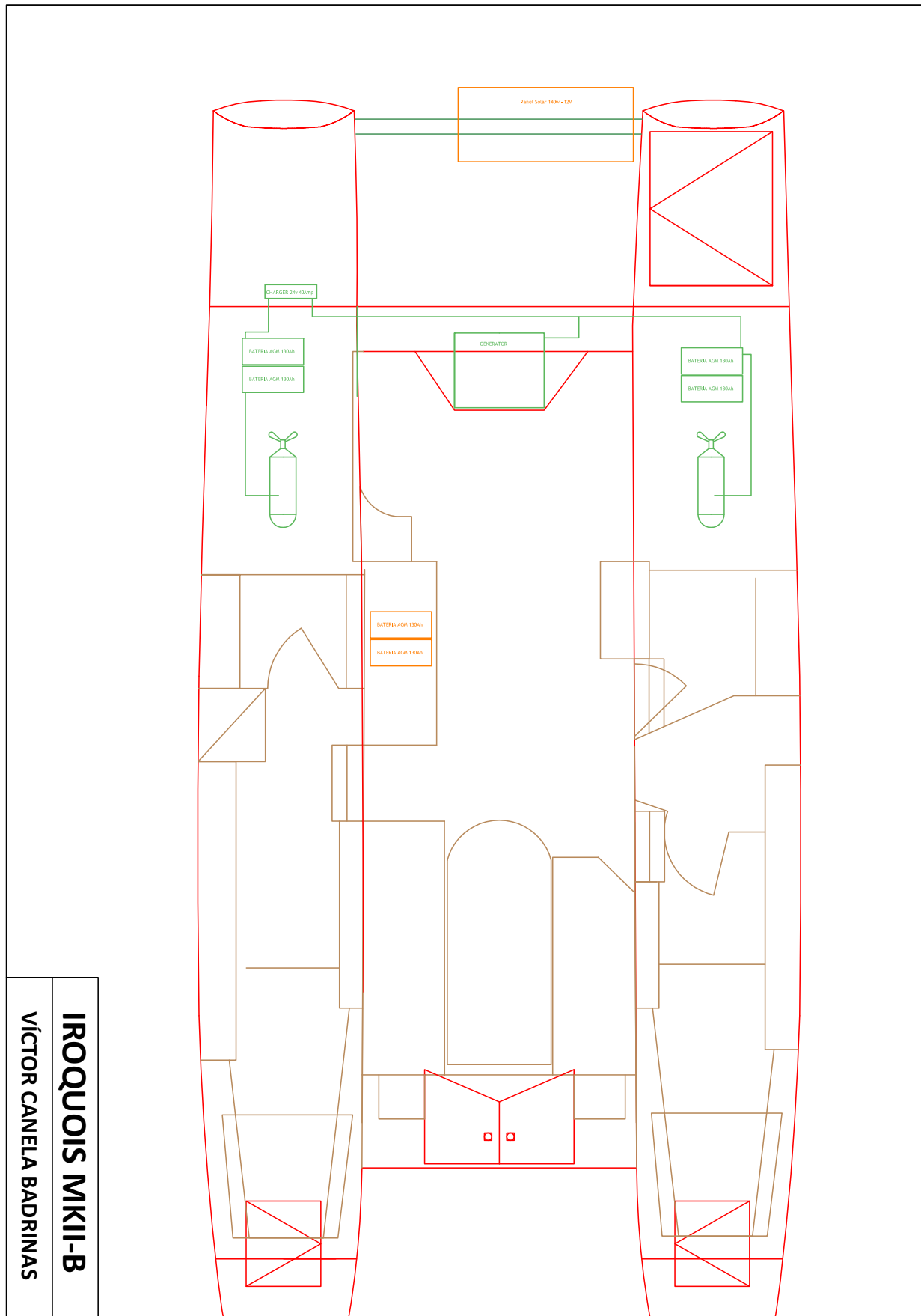


Ilustración 50. Plano de la planta del sistema propulsivo. Fuente: propia.

Anexo 4. Plano de instalación eléctrica servicios

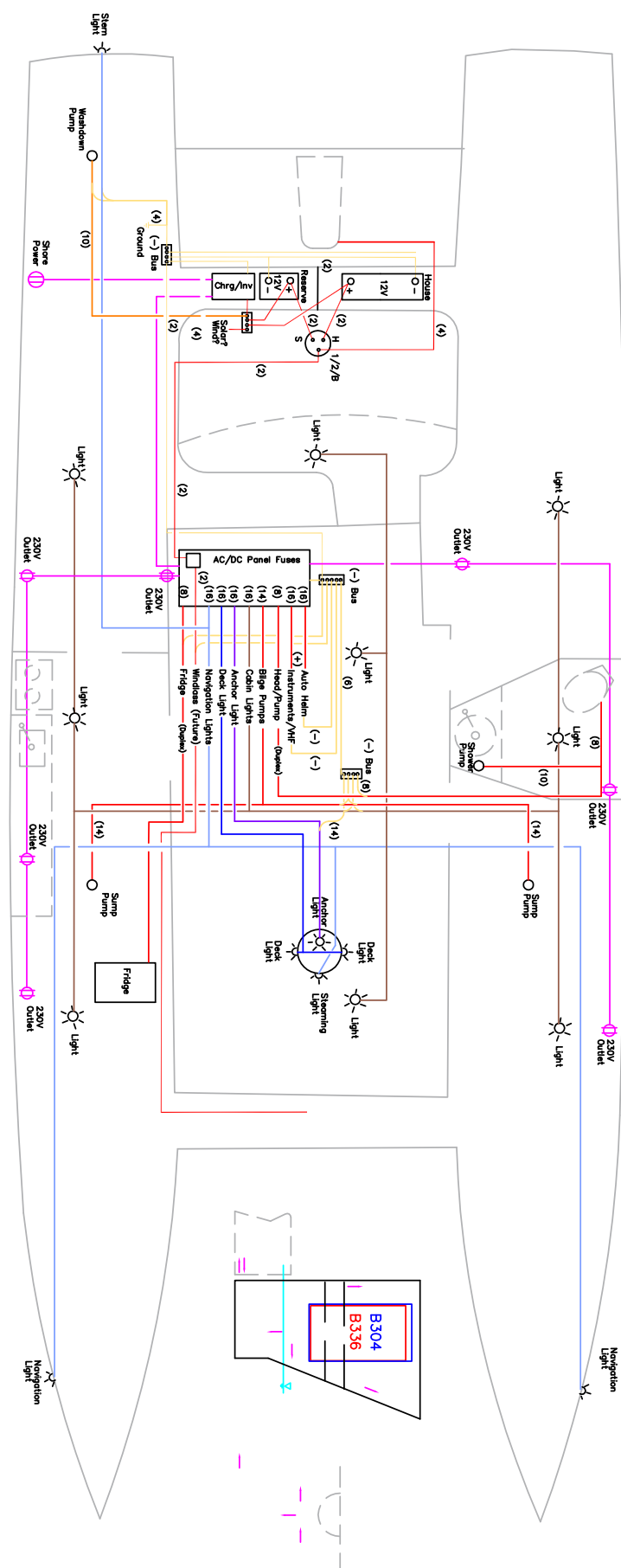


Ilustración 51. Plano de la planta del sistema eléctrico de servicios a 12V. Fuente: propia.

Anexo 5. Plan de mantenimiento Parsun F20HP

3.13 Maintenance Table

When utilized under normal condition, maintained and repaired in the proper manner, the motor can work normally within the normal life period.

Frequency of maintenance operations may be adjusted according to the operating conditions, but the following table gives general guidelines.

The “●” symbol indicates the check-ups which you may carry out by yourself.

The “○” symbol indicates work to be carried out by your Parsun dealer.

Item	Operations	Initial		Every	
		10 hours (1 month)	50 hours (3 months)	100 hours (6 months)	200 hours (1 year)
Anode(s) (external)	Check/replacement		●/○	●/○	
Anode(s) (internal)	Check/replacement				○
Cooling water passages	Cleaning		●	●	
Cowling clamp	Check				●
Fuel filter (disposable)	Check/cleaning	●	●	●	
Fuel system	Check	●	●	●	
Fuel tank (portable tank)	Check/cleaning				●
Gear oil	Change	●		●	
Greasing points	Greasing			●	
Idling speed (carburetor models)	Check/adjustment	●/○		●/○	
Propeller and cotter pin	Check/replacement		●	●	
Shift link/shift cable	Check/adjustment				○
Thermostat	Check				○

Continuation /...1

Item	Operations	Initial		Every	
		10 hours (1 month)	50 hours (3 months)	100 hours (6 months)	200 hours (1 year)
Throttle link/throttle cable/Throttle pick-up timing	Check/adjustment				○
Water pump	Check				○
Engine oil	Check/replacement	●		●	
Oil filter	Change				○
Spark plug (s)	Cleaning/adjustment/replacement	●			●
Timing belt	Check/replacement			○	○
Valve clearance (OHC, OHV)	Check/adjustment	○		○	

NOTE:

When operating in salt water, turbid or muddy water, the engine should be flushed with clean water after every use.

Ilustración 52. Tabla de mantenimiento motor fueraborda. Fuente: Manual de usuario Parsun F20HP.

Anexo 6. Plan de mantenimiento Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS
Fischer Panda
Technical data and tables
F.4 Inspection checklist for services

Inspection-Category				Inspection work			
A	Installation check	D	100 h	1)	check	4)	change
		E	500 h	2)	measure	5)	sealing
B	daily	F	1000 h	3)	clean	6)	check isolation
C	35 - 50 h	G	5000 h				

	Inspection-Category							Inspection work
	A	B	C	D	E	F	G	
01.	5)	5)	5)	5)	5)	5)	4)	coolant water hoses
02.	1)	1)	1)	1)	1)	4)	4)	raw water pump (impeller)
03.	1)	1)	3)	3)	3)	3)	3)	water separator / fuel pre-filter
04.	1)	1)	4)	4)	4)	4)	4)	engine oil
05.					3)	3)		oil strainer
06.	1)	1)	1)	4)	4)	4)	4)	air filter
07.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	fuel lines (leaks)
08.	1)	1)	1)	4)	4)	4)	4)	fine particle fuel filter
09.	1)		1)		1)	1)	1)	valve clearance
10.	1)	1)	4)	5)	4)	4)	4)	valve cover gasket
11.			1)		1)	1)	1)	coolant therm (sensor)
12.			1)		1)	1)	1)	exhaust temp sensor
13.			1)		1)	1)	1)	oil pressure sensor
14.		1)	1)	1)	1)	1)	1)	belt tension
15.	1)	1)	1)	1)	4)	4)	4)	"V" belts
16.						1)	1)	Thermostat
17.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	generator & engine screws
18.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	unit's base mount screws
19.	6)	6)	6)	6)	6)	6)	6)	check electrical cables
20.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	motor reinforced mountings
21.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	actuator mounting
22.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	starter motor mounting screws
23.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	screws generator-engine
24.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	input temp of coolant under load
25.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	outlet temp of coolant under load
26.						4)	4)	generator rotor bearing
27.			1)	1)	1)	1)	1)	signs of corrosion to generator
28.	1)		1)	1)	1)	1)	1)	VCS function test
29.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	voltage without load
30.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	voltage under load
31.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	current under load
32.	2)		2)	2)	2)	2)	2)	engine speed (rpm)
33.						1)	4)	injector test
34.						1)	1)	compression
35.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	hose clips
36.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	recifier
37.	1)	1)	1)	1)	1)	1)	1)	test cable with temperature tester

Ilustración 53. Tabla de mantenimiento del generador. Fuente: Manual de usuario Fischer Panda AGT-DC 4000 PMS.

